



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV STAVEBNÍHO ZKUŠEBNICTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING TESTING

**EXPERIMENTÁLNÍ A NUMERICKÁ ANALÝZA
EXTERNÍHO ZESÍLENÍ ŽELEZOBETONOVÉHO
PRVKU NAMÁHANÉHO OHYBEM**

EXPERIMENTAL AND NUMERICAL ANALYSIS OF STRENGTHENED
REINFORCED CONCRETE MEMBER LOADED BY BENDING LOADS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Czerwek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. PETR ŽÍTT

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

STUDIJNÍ PROGRAM	N3607 Stavební inženýrství
TYP STUDIJNÍHO PROGRAMU	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
STUDIJNÍ OBOR	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
PRACOVISTĚ	Ústav stavebního zkušebnictví

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

DIPLOMANT	Bc. Martin Czerwek
NÁZEV	Experimentální a numerická analýza externího zesílení železobetonového prvku namáhaného ohybem
VEDOUCÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE	Ing. Petr Žítt
DATUM ZADÁNÍ	31. 3. 2016
DATUM ODEVZDÁNÍ	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

.....
doc. Ing. Pavel Schmid, Ph.D.

Vedoucí ústavu

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA

Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- [1] EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí
- [2] EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí
- [3] ČSN 73 2030 Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí
- [4] Schmid, P., kol, Základy zkušebnictví, FAST VUT v Brně, 2000
- [5] Ostatní související ČSN, EN, ISO
- [6] Manuál programu ATENA, Červenka Consulting

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ (ZADÁNÍ, CÍLE PRÁCE, POŽADOVANÉ VÝSTUPY)

Návrh způsobu provedení zatěžovacích zkoušek železobetonových prvků namáhaných čtyřbodovým ohybem při prostém (vetknutém) uložení nosníku. Na základě zvolené zatěžovací rozvahy a způsobu uložení nosníku navrhnout teoretické vyztužení ŽB prvku včetně návrhu jeho zesílení (statický výpočet). Vypracování projektu měření statické zatěžovací zkoušky a doprovodných měření (pevnosti materiálů, moduly pružnosti atd.). Tvorba matematického modelu softwarem Atena. Vyhodnocení a porovnání výsledků analytické a experimentální části řešení. Doporučení pro realizace experimentálních zkoušek obdobného typu.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ/DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

.....
Ing. Petr Žítt

Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Návrh a výroba zkušebních železobetonových trámů pro účely laboratorního zkoušení. Provedení vybraných zkoušek mechanických vlastností na vybraných tělesech. Experimentální analýza železobetonových trámů v laboratoři. Tvorba numerického modelu v softwaru ATENA 2D. Grafické zpracování výsledků numerické a experimentální analýzy a jejich porovnání.

KLÍČOVÁ SLOVA

Beton, betonářská výztuž, externí výztuž, zesilování konstrukcí, normová tělesa, trám, měření, zatěžovací zkouška, čtyřbodový ohyb, snímače, numerická analýza, statický výpočet

ABSTRACT

Design and manufacture of reinforced concrete beams for laboratory testing. Implementation of selected tests of mechanical properties for selected elements. Experimental analysis of reinforced concrete beams in the laboratory. Creating a numerical model in the software ATENA 2D. Graphic processing of numerical and experimental analysis and comparison.

KEYWORDS

Concrete, concrete reinforcement, external reinforcement, strengthening of structures, standard specimens, beam, measurement, load test, four-point bending, sensors, numerical analysis, static calculation

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Martin Czerwek *Experimentální a numerická analýza externího zesílení železobetonového prvku namáhaného ohybem*. Brno, 2016. 69 s., 64 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Žitt

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

.....

podpis autora

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané typ práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 1. 2017

titul jméno a příjmení studenta

OBSAH

OBSAH	8
1. ÚVOD	11
2. CÍLE PRÁCE	12
3. ZESILOVÁNÍ KONSTRUKCÍ	13
3.1. DRUHY ZESILOVÁNÍ KONSTRUKCÍ	14
3.2. DOBETONOVÁNÍ ČÁSTI PRVKU	15
3.3. EXTERNÍ ZESÍLENÍ OCELOVÝMI PRVKY	15
3.3.1. Použití externích ocelových prvků	16
3.3.2. Poloha externích kotvených prvků	16
3.3.3. Kotvení externích ocelových prvků	17
3.4. EXTERNÍ ZESÍLENÍ NEKOVOVÝMI PRVKY	18
3.4.1. Rozdělení nekovových kompozitů	19
3.4.2. Vlastnosti uhlíkových lamel CFK	20
3.4.3. Aplikace uhlíkových lamel	20
3.4.4. Výhody použití uhlíkových lamel	21
4. NÁVRH A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES	23
4.1. NÁVRH ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES	23
4.2. OBECNÉ ZÁSADY PRO NÁVRH ČERSTVÉHO BETONU	24
4.2.1. Cement	25
4.2.2. Kamenivo	26
4.2.3. Záměsová voda	27
4.2.4. Přísady	28
4.2.5. Příměsi	29
4.3. NÁVRH ČERSTVÉHO BETONU NA VÝROBU ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES	29
4.4. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES	30
4.4.1. Příprava bednění	30
4.4.2. Betonáž	31

4.4.3.	<i>Ošetřování betonu</i>	32
4.5.	DODATEČNÉ ZESÍLENÍ PRVKU	32
4.5.1.	<i>Prvky použité pro zesílení</i>	32
4.5.2.	<i>Zesílení prvku pomocí CFK lamely</i>	34
5.	LABORATORNÍ ZKOUŠKY PRO ZJIŠTĚNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ BETONU A OCELI	36
5.1.	PEVNOST BETONU V TLAKU	36
5.2.	STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI BETONU	37
5.4.	TAHOVÁ ZKOUŠKA OCELI	42
6.	EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA	45
6.1.	LABORATORNÍ ZKOUŠENÍ NEZESÍLENÉHO PRVKU	45
6.2.	LABORATORNÍ ZKOUŠENÍ ZESÍLENÉHO PRVKU	49
7.	NUMERICKÁ ANALÝZA	53
7.1.	ZÁKLADNÍ INFORMACE	53
7.2.	ŘEŠENÍ MODELU	53
7.2.1.	<i>Topologie</i>	53
7.2.2.	<i>Zatížení a podpory</i>	55
7.2.3.	<i>Výpočet</i>	56
7.2.4.	<i>Grafické zobrazení modelu</i>	56
8.	VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	59
8.1.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY	59
8.2.	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÉ ANALÝZY	60
8.2.1.	<i>Vyhodnocení výsledků programu ATENA 2D</i>	60
8.2.2.	<i>Vyhodnocení výsledků statického výpočtu</i>	62
8.3.	POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ	63
8.3.1.	<i>Porovnání výsledků nezesíleného prvku</i>	64
8.3.2.	<i>Porovnání výsledků zesíleného prvku</i>	64
9.	ZÁVĚR	65
10.	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	67

10.1.	SEZNAM NOREM	67
10.2.	SEZNAM SKRIPT A OPOR	67
10.3	SEZNAM BAKALÁŘSKÝCH A DIPLOMOVÝCH PRACÍ	68
10.4	SEZNAM INTERNETOVÝCH ZDROJŮ	69
11.	SEZNAM PŘÍLOH	70
PŘÍLOHA P1 – VYHODNOCENÍ DOPROVODNÝCH ZKOUŠEK		
MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ		71
PŘÍLOHA P2 – VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE		77
PŘÍLOHA P3 – STATICKÝ VÝPOČET		79
P 3.1	VÝPOČET NEZESÍLENÉHO PRVKU	81
P 3.2	VÝPOČET ZESÍLENÉHO PRVKU	86
PŘÍLOHA P4 – VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY		91
P 4.1	ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA NEZESÍLENÉHO PRVKU	92
P 4.2	ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA ZESÍLENÉHO PRVKU	94
PŘÍLOHA P5 – VYHODNOCENÍ NUMERICKÉ ANALÝZY		98
P 5.1	VÝSTUPY ANALÝZY NEZESÍLENÉHO PRVKU	99
P 5.2	VÝSTUPY ANALÝZY ZESÍLENÉHO PRVKU	104
PŘÍLOHA P6 – FOTODOKUMENTACE		112
P 6.1	DOPROVODNÉ ZKOUŠKY	113
P 6.2	VÝROBA ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ	119
P 6.3	EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA NEZESÍLENÉHO PRVKU	120
P 6.4	EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA ZESÍLENÉHO PRVKU	127

1. ÚVOD

V současné době dochází čím dál častěji k rekonstruování starších betonových staveb. V rámci rekonstrukcí často také dochází k změnám užívání stavby. Statické posouzení podle současných norem je přísnější, než podle norem dřívějších. Železobetonové stavby proto se stávajícím betonem a vyztužením již staticky nevyhovují. Jednou z možností, jak splnit současné normy, je zesilování betonových konstrukčních prvků.

Diplomová práce se zabývá experimentální a numerickou analýzou železobetonového prvku zesíleného externí lepenou výztuží. Železobetonový prvek bude zkoušen v čtyřbodovém ohybu, který simuluje spojitě ohybové zatížení. V rámci diplomové práce se bude pracovat se dvěma tělesy z konstrukčního betonu, z nichž jedno bude zesílené externí lepenou výztuží a druhé bude sloužit jako referenční pro porovnání a zjištění účinků zesílení.

Tělesa budou vytvořena podle receptury zvolené tak, aby odpovídala požadované pevnosti a kvalitě zkoušeného prvku. Při betonáži budou odebrány reprezentativní vzorky pro zkoušení doprovodných vlastností použitého betonu. Experimentální analýza železobetonového prvku a zjištění doprovodných vlastností bude provedeno v prostorách Ústavu stavebního zkušebnictví VUT v Brně.

Dále bude provedena numerická analýza železobetonových prvků v programu ATENA 2D, založeného na metodě konečných prvků. Bude proveden ruční statický výpočet mezní únosnosti a mezního přetvoření dle ČSN EN 1992.

2. CÍLE PRÁCE

Cílem práce je seznámení s metodami zesilování konstrukcí, teoretický návrh a výroba železobetonových prvků a jejich analýza ve stavu bez zesílení a se zesílením pomocí externí lepené uhlíkové výztuže.

- výroba zkušebních těles a laboratorní stanovení mechanicko-fyzikálních vlastností betonu a betonářské výztuže
- výroba dvou identických železobetonových trámů a experimentální analýza pomocí čtyřbodového ohybu prvku nezesíleného a prvku zesíleného externí lepenou výztuží
- numerická analýza modelu nezesíleného a zesíleného železobetonového prvku v programu ATENA 2D s vlastnostmi z laboratorních zkoušek, statický výpočet s normovými a reálnými hodnotami
- vyhodnocení a porovnání výsledků experimentální a numerické analýzy

3. ZESILOVÁNÍ KONSTRUKCÍ

Zesilování konstrukcí bývá často nedílnou součástí moderního stavitelství, především pak při rekonstrukcích staveb. Pomocí zesilování se dosahuje požadované spolehlivosti konstrukce při působícím zatížení na mezní stav únosnosti a mezní stav spolehlivosti. Je třeba také myslet na ochranu konstrukce před agresivním prostředím, požárem a také na životnost konstrukce. Pro úspěšné zesílení je třeba provést diagnostiku konstrukce.[3-1][3-2]



Obrázek 3-1 Dodatečné zesílení betonového překladu vnější výztuží [3-2]

Do oblastí použití zesilování patří:

- zesilování železobetonových trámových, deskových, sloupových a stěnových prvků
- zesilování železobetonových mostních konstrukcí

- zesilování dřevěných prvků stropních a trámových
- ztužování oválných a kruhových železobetonových konstrukcí ovíjením

Důvody a cíle zesilování

- zvýšení užitého zatížení a nedostatečné únosnosti
- změna účelu stavby
- oslabení konstrukce např. prostupy a otvory
- odstranění chyb v projektu nebo v provedení konstrukce
- prodloužení životnosti konstrukce
- odstranění koroze betonu a výztuže
- zvýšená agresivita prostředí
- změna nebo ukončení platnosti normových předpisů
- stárnutí konstrukce
- odstranění následků požáru konstrukce

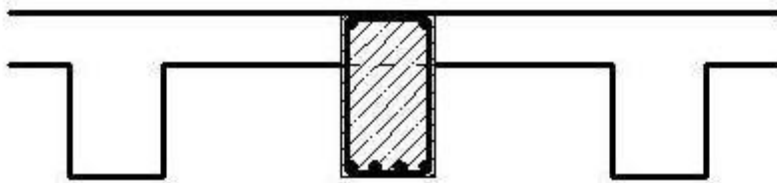
3.1. DRUHY ZESILOVÁNÍ KONSTRUKCÍ

Zesilování lze provádět:

- Dobetonováním části prvku
- Externím zesílením ocelovými prvky
 - Mechanicky kotvené zesílení
 - Externě lepené zesílení
 - Dodatečné zesílení předpětím
- Externím zesílením prvků na bázi uhlíkových a skleněných vláken
 - Aplikace helikální výztuže
 - Aplikace uhlíkových lamel
 - Aplikace uhlíkových lamel formou předpětí
 - Aplikace tkanin na konstrukci

3.2. DOBETONOVÁNÍ ČÁSTI PRVKU

Zesílení konstrukce pomocí dobetonování patří mezi klasické druhy zesilování. Jedná se o pracovní metodu, při které je nutný zásah do konstrukce a nelze úplně zajistit spolupůsobení konstrukce nového betonu s betonem stávajícím.[4-6]



Obrázek 3-2 Zesilování konstrukce žb stropu pomocí dobetonávky [4-6]

3.3. EXTERNÍ ZESÍLENÍ OCELOVÝMI PRVKY

Zesilování pomocí externích ocelových prvků s sebou nese výhody, ale také nevýhody. Mezi výhody patří například to, že konstrukce takto zesílená je stále brána jako železobetonová konstrukce. Ocelové prvky lze mechanicky ukotvit, pevně přilepit k betonu a také vzájemně svařovat. Existuje velký sortiment cenově dostupných typů a druhů ocelových prvků. Mezi nevýhody patří náchylnost ocelové výztuže ke korozi, je tedy nutné ji opatřit antikorozním nátěrem. Zároveň dochází, vzhledem k vysoké objemové hmotnosti oceli, ke zvýšení hmotnosti konstrukce. [3-1][3-2]

Mezi zesilování pomocí ocelových prvků patří také externí zesílení předpětím. Jedná se o častý způsob zesilování a zabezpečování stávajících konstrukcí. Pomocí předpínání se zvyšuje ohybová únosnost, smyková únosnost, celková únosnost a stabilita konstrukcí. Existuje široká škála použití předpětí a to je popsáno v mnoha publikacích.



Obrázek 3-3 Zesilování žb trémového stropu ocelovými prvky [4-6]

3.3.1. *Použití externích ocelových prvků*

Lze použít pásovou ocel tloušťky 3 – 5 mm. Při větší požadované tloušťce ocelových prvků je vhodné přilepit několik vrstev na sebe. Šířka ocelových prvků se pohybuje od 15 do 600 mm s přírůstkem po 5 mm.

Z ocelového prvku musí být před kotvením odstraněna povrchová koroze a mastnota z výroby. Beton musí být upraven odstraněním degradované části, nejčastěji obroušením. Někdy je také třeba přidat novou vrstvu kvalitního betonu, tedy odstranit degradovanou část betonu a zapravit povrch kvalitním betonem.

3.3.2. *Poloha externích kotvených prvků*

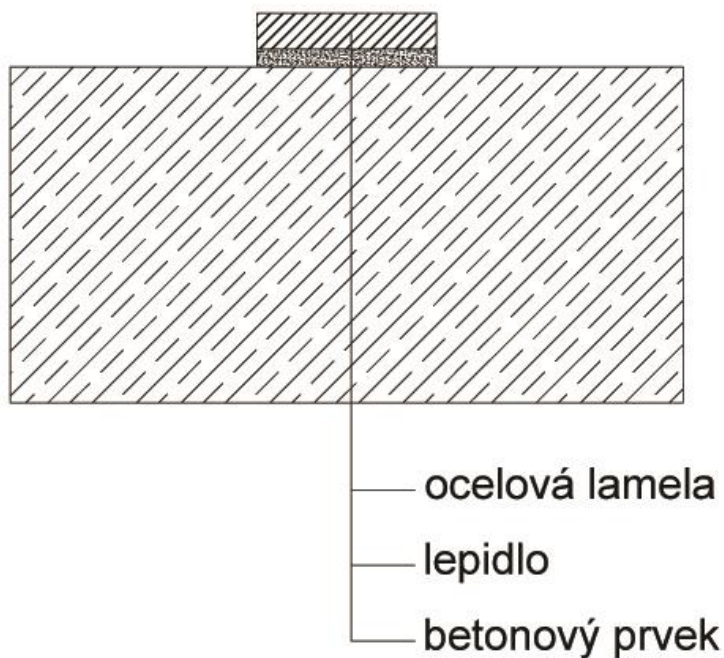
Externí prvky mohou být umístěny v dolní tažené části prvku, v horní tažené části prvku, v oblasti působení smykových napětí, na horním líci v tažené oblasti u spojitých nosníků, nebo v několika oblastech najednou.

3.3.3. Kotvení externích ocelových prvků

Druh kotvení závisí na druhu a pevnosti betonu, druhu betonářské výztuže, technické dostupnosti vybavení a požadavků na rychlost provedení prací.

Existují tyto způsoby kotvení:

- Kotvení šrouby
- Kotvení nastřelovacími hřebíky
- Kotvení pomocí skob a trnů
- Kotvení do hmoždinek
- Připevnění objímkami nebo svěrkami
- Přilepení lepidlem
- Připevnění na stávající betonářskou výztuž
- Připevnění do předem připravené drážky se zapravením lepidlem
- Kombinace více způsobů



Obrázek 3-4 Schéma externího zesílení pomocí ocelového prvku [3-2]

3.4. EXTERNÍ ZESÍLENÍ NEKOVOVÝMI PRVKY

Nekovové zesilovací prvky zahrnují vlákna vyztužované polymerní materiály (FRP). Jedná se tedy o kompozitní materiály, které sestávají z vysokopevnostních vláken, která přenášejí především tahové namáhání, určují podélný směr a tvoří 40 – 60% kompozitu. Vlákná jsou obalena matricí, která drží vlákna pohromadě, roznáší namáhání prvku a přenášejí především tlak.

Vysokopevnostní vlákna se vybírají obvykle na základě tuhosti, pevnosti a trvanlivosti, tedy vlastností, které jsou vyžadovány pro danou aplikaci. Pryskyřice se vybírají na základě prostředí, ve kterém bude materiál umístěn, a podle technologie výroby.[4-6]

Existují tři základní typy vláken nekovových prvků[4-1]:

- *Sklenná* – modul pružnosti v tahu kolem 60 GPa, pevnost v tahu 1000 MPa, vhodné pro prvky namáhané seismickým a krátkodobým zatížením
- *Aramidová (kevlarová)* – modul pružnosti v tahu kolem 100 GPa a pevnost v tahu 2000 MPa
- *Uhlíková* – modul pružnosti v tahu až 600 GPa, pevnost v tahu až 4000 MPa, nejvhodnější pro železobetonové konstrukce

Mezi hlavní výhody nekovových prvků patří vysoká tuhost a pevnost při nízké hmotnosti, směrově orientované vlastnosti, vysoká tepelná a chemická odolnost, ohnivzdornost, nízká tepelná roztažnost, elektrická a tepelná vodivost. Mezi nevýhody patří zejména vysoká pořizovací cena, složitý konstrukční návrh a výroba, spoje mezi jednotlivými lamelami, opracovatelnost, recyklace a také složité opravy.

3.4.1. Rozdělení nekovových kompozitů

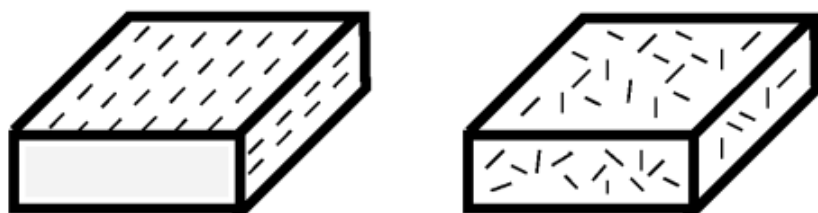
Nekovové kompozity dělíme na částicové a vláknové[4-6].

Částicové dělíme na:

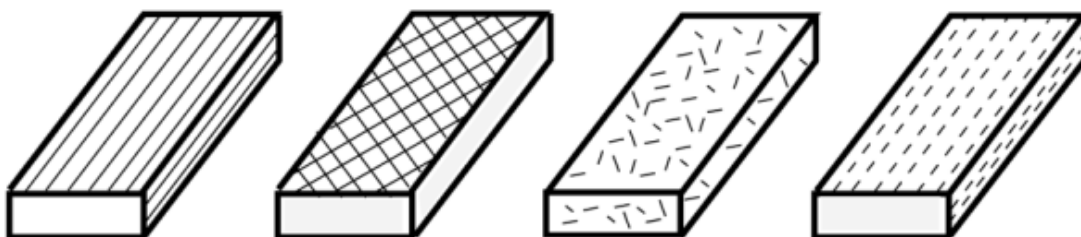
- orientované
- neorientované

Vláknové dělíme na:

- jednovrstvé
 - dlouhoválnové
 - jednosměrové
 - dvousměrové (tkaniny)
 - 3D tkaniny
 - krátkoválnové
 - orientované
 - neorientované (rohože)
- vícevrstvé
 - lamináty
 - hybridní lamináty
 - sendviče



Obrázek 3-5 Částicové kompozity [4-6]

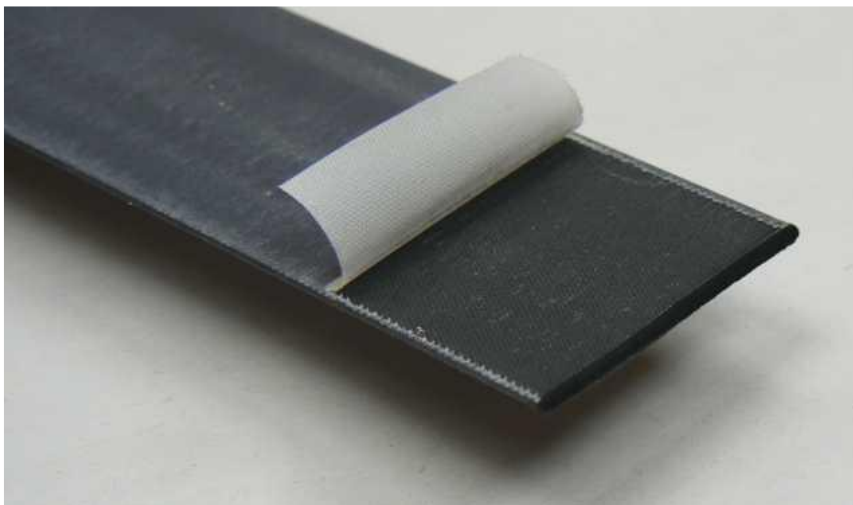


Obrázek 3-6 Vláknové kompozity [4-6]

3.4.2. *Vlastnosti uhlíkových lamel CFK*

Lamela CFK (Carbon – Faser – Kunststoff) je složena z dvou hlavních prvků, kterými jsou matrice, tvořená epoxidovým lepidlem, a velké množství tenkých uhlíkových vláken. Lepení se provádí pomocí lepidel na bázi epoxydové pryskyřice. V podélném směru mají lamely vysokou pevnost, tuhost a únavovou pevnost při malé objemové hmotnosti. Pevnost ve smyku a v tahu kolmo na vlákna je velice malá. Mechanické vlastnosti jednotlivých lamel zajišťuje jejich výrobce. [4-8]

Metoda zesilování pomocí uhlíkových lamel je velice podobná jako zesilování pomocí ocelových lamel. Jedná se však o modernější metodu, která přináší výhody v jejich mechanických vlastnostech a jednoduchosti provádění. Nevýhoda spočívá v mnohem vyšší pořizovací ceně oproti ocelovým lamelám.[4-1]



Obrázek 3-7 Uhlíková lamela [4-6]

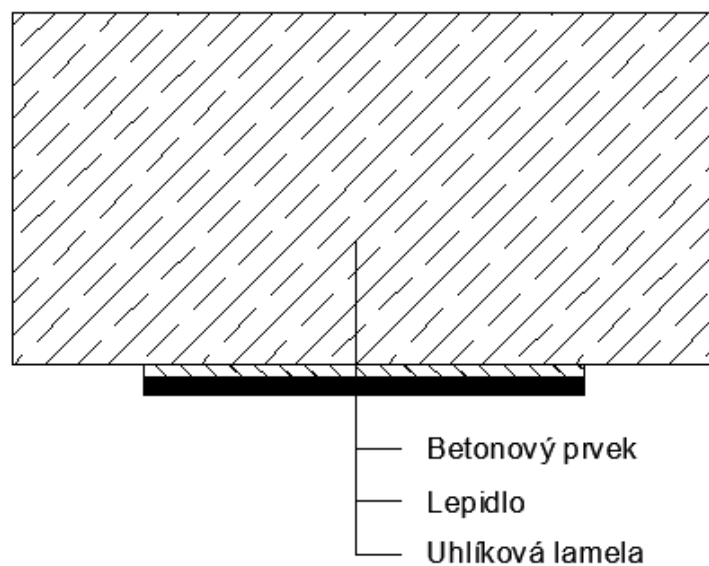
3.4.3. *Aplikace uhlíkových lamel*

Zesilování konstrukcí pomocí uhlíkových lamel probíhá ve dvou krocích. Prvním krokem je příprava podkladu pro lepení lamely, to znamená odstranění nesoudržných vrstev pomocí vysokotlakých metod, broušením nebo opermlováním. Neúnosné a zkarbonatované povrchové vrstvy betonu nejsou vhodné pro tento typ zesílení. Je třeba odstranit veškeré nerovnosti povrchu,

zbavit jej vlhkosti a také odmastit. Druhým krokem je samotná aplikace lamely, která se většinou aplikuje jen pomocí lepidla, výztužné tkaniny se aplikují pomocí laminační pryskyřice. Pro různé aplikace a projekty je nutno zpracovat technologické postupy, aby byly zohledněny specifické problémy dané konstrukce. Po přilepení lamely je nutné vyvodit přítlak do zatvrdnutí lepidla.[4-3]

3.4.4. Výhody použití uhlíkových lamel

Výhody uhlíkových lamel spočívají v použití na dlouhých stavebních dílcích (mosty, dlouhé nosníky), při esteticky náročném umístění se dají snadno skrýt pod omítku nebo nátěr. Je jednoduché je použít v případě, že dochází ke křížení lamel, např. u obousměrně vyztužených desek. Snadná aplikace je i ve stísněných prostorech. S výhodou se rovněž použijí při zvětšování stavebních otvorů, při bourání stěn a podpěr. [3-2]



Obrázek 3-8 Schéma externího zesílení pomocí uhlíkové lamely [4-6]



Obrázek 3-9 Aplikace uhlíkových lamel na konstrukci [4-6]

4. NÁVRH A VÝROBA ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

4.1. NÁVRH ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

Dle možností zkušební laboratoře byly vytvořeny dva identické zkušební prvky o rozměrech 2200 * 120 * 240 mm, z nichž jeden byl zesílen externí lepenou uhlíkovou výztuží. Objem potřebného betonu je 63,4 litrů. Pro betonáž prvku bylo vytvořeno nové bednění, do kterého se zároveň vybetonovala obě tělesa.

Tabulka 4-1 Zkušební tělesa a jejich objem

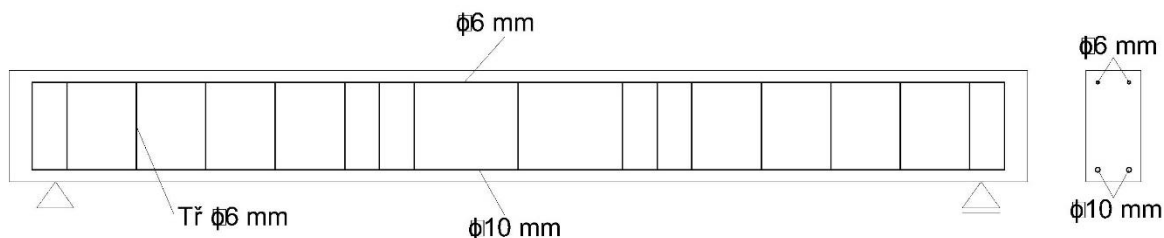
Rozměry zkušebních prvků	Objem prvku [m ³]	Počet těles [ks]	Celkový objem prvků [m ³]
120*240*2200 mm	0,06336	2	0,12672
Celkový objem zkušebních těles			0,12672 (127 litrů)

Pro zjištění doprovodných vlastností betonu byly vytvořeny tělesa pro zkoušky, jejichž výsledky byly použity v numerické analýze.

Tabulka 4-2 Doprovodná tělesa a jejich objem

Rozměry doprovodných těles	Objem tělesa [m ³]	Počet těles [ks]	Celkový objem těles [m ³]
Krychle 150*150*150 m ³	0,00338	6	0,02025
Hranol 100*100*400 m ³	0,004	6	0,024
Celkový rozměr doprovodných těles			0,04425 (44,25 litrů)

Pro zkušební tělesa byla navržena nosná výztuž dle ČSN EN 1992-1-1 [1-5], ostatní výztuž byla navržena dle konstrukčních zásad. Na základě návrhu výztuže byl vyroben armokoš. Jeho schéma je zřejmé z obrázku 4-3. Jedná se o horní výztuž $\phi 6$ mm, dolní výztuž $\phi 10$ mm a třmínky $\phi 6$ mm.



Obrázek 4-3 Schéma vyztužení železobetonového trámu

4.2. OBECNÉ ZÁSADY PRO NÁVRH ČERSTVÉHO BETONU

Beton je silikátový vícekompozitní materiál, jehož matrice je tvořena zatvrdlým cementovým kamenem, a výplň je tvořena kamenivem. Mezi hlavní složky betonu patří tedy kamenivo, cement, záměsová voda, přísady a příměsi. Své vlastnosti beton získává hydratací cementu. [4-5]

Rozlišujeme beton čerstvý, který je již zamíchaný a je ve stavu, kdy je možno jej zhutnit, a beton zatvrdlý, který je již v pevném stavu a má určitou pevnost. [4-5]

Beton se z konstrukčního hlediska dělí:

- Prostý beton – má velkou pevnost pouze v tlaku, v tahu minimální
- Železobeton – vkládání železné výztuže pro přenesení tahu
- Předpjatý beton – vkládání předpínací výztuže, která vnáší do betonu tlak
- Vlákno-beton, drátko-beton – rozptýlená kovová nebo nekovová výztuž

Beton se dle ČSN EN 206 [1-2] dělí do pevnostních tříd a označuje se C (jako Concrete – beton) a dvěma lomítkem oddělenými čísly (např. 20/25).

První číslo značí charakteristickou pevnost (95% horní kvantil normálního rozdělení) v tlaku na válcových tělesech o $\phi 150$ mm a výšce 300 mm. Druhé číslo značí charakteristickou pevnost na krychlech o hraně 150 mm.

Mezi základní vlastnosti betonu patří jeho vysoká pevnost a trvanlivost, dobrá zpracovatelnost, nehořlavost, a možnost vytváření konstrukcí různých tvarů.

Beton se dělí dle:

- Druhu použitého pojiva (cement, vápno, sádra, živice...)
- Stupně vlivu prostředí (bez vlivu, vliv karbonatace, vliv chloridů, střídavé rozmrazování)
- Konzistence čerstvého betonu (klasifikace podle sednutí kužele...)
- Způsobu dopravy čerstvého betonu
- Způsobu uložení čerstvého betonu do konstrukce (monolitický, prefabrikovaný)
- Způsobu zpracování čerstvého betonu
- Objemové hmotnosti čerstvého betonu (lehký, obyčejný, těžký)
- Pevnostní třídy ztvrdlého betonu (C 12/15, C 20/25...),

4.2.1. *Cement*

Cement je polydisperzní partikulární anorganická látka s hydraulickými vlastnostmi. Při smíchání cementu s vodou vzniká směs, která na vzduchu tuhne a tvrdne hydratací vápenatých silikátů a aluminátů. Cement pak zachovává svou pevnost a stálost jak na vzduchu, tak pod vodou.

Dle ČSN EN 197-1[1-2] se cementy dělí podle směsnosti na:

- Portlandský I.
- Portlandský směsný II.
- Vysokopecní III.
- Pucolánový IV.
- Směsný V.

- Hlinitanový – nesmí se používat

Dále se cement dělí na třídy pevnosti dle pevnosti v tlaku v MPa:

- 32,5 (R)
- 42,5 (R)
- 52,5 (R)

Přičemž R značí cementy s vyššími počátečními pevnostmi.

Potřebná dávka cementu se vypočte dle zrnitosti kameniva. Minimální dávka cementu pro obalení kameniva je 100 kg na 1 m³ čerstvého betonu. Minimální dávka pro prostý beton je 200 kg na 1 m³ kameniva a min. 240 kg pro železobeton. Maximální dávka cementu se doporučuje 450 kg na 1 m³ čerstvého betonu, další zvyšování množství cementu nezvyšuje pevnost betonu. U vysokopevnostních betonů se pohybuje dávka kolem 550 kg na 1 m³ č.b. Optimální dávka cementu je dávka, která zajistí obalení všech zrn kameniva a vyplní mezery mezi nimi. Cement je nejdražší složka betonu, proto je třeba jeho spotřebu minimalizovat.[2-1][4-5]

4.2.2. *Kamenivo*

Kamenivo zaujímá 75 – 80 % objemu betonu. Jeho úkolem je vytvořit pevnou kostru s minimální mezerovitostí. Kamenivo musí obsahovat zrna různé velikosti ve vhodném poměru. Maximální velikost zrna kameniva je 125 mm.

Kamenivo rozdělujeme dle původu na:

- Přírodní – používají se v drtivé většině
- Umělé

Přírodní kameniva se dělí na:

- Těžené – vzniká přírodním rozpadem hornin, zaoblenější zrna
- Drcené – vzniká podrcením lomového kamene, ostřejší zrna
- Předrcené – 40-80% podrcených zrn

Podle objemové hmotnosti se kamenivo dělí na:

- Hutné
- Pórovité

Frakce kameniva je dána nejmenší D_{\min} největší D_{\max} velikostí zrna kameniva.

Základní frakce kameniva jsou 0/4, 4/8, 8/16, 16/22, 22/32,5 atd.

Dle frakce se kamenivo dělí na:

- Hrubé kamenivo – velikost zrn 4 – 125 mm (štěrk, drť)
- Drobné kamenivo – velikost zrn 0,25 – 4 mm (písek)
- Jemné kamenivo – velikost zrn do 0,25 mm (moučka, filler)
- ŠP - Štěrkopísek – směs drobného a hrubého těžného kameniva
- ŠD - Štěrkodrt' – směs drobného a hrubého drceného kameniva

Spojením kameniva s cementovou pastou vzniká kompaktní hmota. Do betonu je nejvhodnější použít 3 až 4 frakce kameniva, aby vznikla hutná kostra s co nejmenší mezerovitostí. Ideální poměr je použití asi 40% drobného kameniva a 60% hrubého kameniva. Pro výrobu kvalitního betonu se používá kamenivo s vysokou pevností, trvanlivostí, odolností proti povětrnosti a mrazu, a s minimální nasákavostí. Kamenivo nesmí obsahovat nečistoty a látky, které při reakci s cementem vytváří nežádoucí objemové změny betonu, vedoucí k vnitřnímu napětí a poklesu pevnosti betonu.[2-1][4-5]

4.2.3. Záměsová voda

Další důležitou součástí betonu je záměsová voda, která je potřebná jednak k hydrataci cementu, a také pro dobrou zpracovatelnost směsi. Pro samotnou hydrataci je potřeba 20 – 25% vody z hmotnosti cementu. Hydratace cementu je chemická reakce, díky které beton tuhne a následně tvrdne a vznikají ze slinkových minerálů hydrokřemičitany a hydrohlinitany.

Množství vody však musí být větší, aby došlo ke snížení tření mezi zrny a beton byl tak lépe zpracovatelný. Poměr hmotnosti vody k hmotnosti cementu se označuje jako vodní součinitel:

$$w = v/c [-]$$

Obvykle se jeho hodnota pohybuje v rozmezí 0,35 – 0,8.

Záměsová voda se rozdělí do tří forem: fyzikálně vázaná, chemicky vázaná a volná, která je obsažena v dutinách a pórech.

Vodu lze rozdělit na záměsovou, která se dávkuje při míchání betonu, a ošetřovací, která se dodává po zatuhnutí betonu.

Zákon vodního součinitele říká, že při zvyšujícím se vodním součiniteli klesá pevnost betonu.[2-1][4-5]

4.2.4. *Přísady*

Přísady jsou chemické látky, které se přidávají do betonu během míchání za účelem změny vlastností čerstvého a ztvrdlého betonu.

Dle vlastností, které modifikují, se dělí na:

- Plastifikátory – redukují potřebné množství vody až o 5%
 - Superplastifikátory – redukují potřebné množství vody až o 12%
 - Stabilizující – zadržují vodu
 - Provzdušňující – vytváří větší množství uzavřených pórů, tím se zvyšuje odolnost vůči mrazu a chloridům
 - Urychlující tuhnutí betonu – urychlují přechod z čerstvého do tuhého stavu
 - Urychlující tvrdnutí betonu – urychlují vývoj počátečních pevností betonu
 - Zpomalující tuhnutí betonu
- [2-1][4-5]

4.2.5. *Příměsi*

Příměsi jsou práškové látky, které se přidávají do čerstvého betonu, za účelem zlepšení některých vlastností nebo docílení zvláštních vlastností. Přidávají se v množství, které nepříznivě neovlivní vlastnosti betonu.

Dělí se na dva typy:

- Typ I – Inertní příměsi – kamenné moučky, barevné pigmenty
- Typ II – Pucolány neboli latentně hydraulické příměsi – létavý popílek, křemičité úlety

[2-1][4-5]

4.3. NÁVRH ČERSTVÉHO BETONU NA VÝROBU ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

Návrh čerstvého betonu na výrobu prvků a těles byl proveden dle předepsané receptury podle ČSN EN 206 [1-1] s ohledem na expoziční požadavky, technologii zpracování a pevnost betonu. Existuje několik výpočetních metod, podle kterých se navrhuje složení směsi. Tyto metody vycházejí z vlastností jednotlivých materiálů, požadované konzistence čerstvého betonu a výsledné pevnosti v tlaku. Výsledkem návrhu je složení čerstvého betonu, které splní všechny technologické požadavky a požadavky normy.

Beton pro zkušební tělesa byl vyroben v betonárně s požadavkem na pevnostní třídu C20/25.

Laboratorní zkoušky doprovodných prvků, které jsou potřeba pro numerickou analýzu, jsou uvedeny v tabulce. Tato doprovodná tělesa byla vytvořena ze stejného betonu, jako zkušební prvky. Uvedené zkoušky byly provedeny 28 dní po betonáži těles. Všechny zkoušky byly destruktivní.

Tabulka 4-3 Přehled laboratorních zkoušek mechanických vlastností na doprovodných tělesech

Zkouška	Tělesa	Počet těles
Krychelná pevnost	Krychle o hraně $a=150\text{mm}$	6
Hranolová pevnost	Hranol o podstavě $a*b=100*100\text{ mm}$ a výšce $h=400\text{mm}$	3
Statický modul pružnosti	Hranol o podstavě $a*b=100*100\text{ mm}$ a výšce $h=400\text{mm}$	3

4.4. VÝROBA ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ A DOPROVODNÝCH TĚLES

4.4.1. Příprava bednění

Pro oba prvky bylo zhotoveno jedno bednění. Materiál bednění sestává z voděodolné překližky, spojované pomocí samořezných šroubů. Oba zkušební prvky od sebe byly odděleny vnitřní stěnou. Tloušťka překližky byla 18 mm. Vnitřní rozměry pro jeden prvek byly $120*240*2200\text{ mm}$. Bednění bylo vyrobeno úpravou již použitého bednění v laboratoři Ústavu stavebního zkušebnictví.

Pro oba zkušební prvky byl vyroben armokoš dle obr.4-3. Třmínky byly nařezány na elektrické brusce, následně ohýbány do požadovaného tvaru, a poté připevněny na podélnou výztuž pomocí drátků. Před samotnou betonáží bylo bednění natřeno vrstvou odbedňovacího oleje, aby bylo možné po vyztření betonu bednění odejmout. Armokoš byl osazen distančníky a následně vložen do bednění.

Následně bylo bednění společně s armokošem převezeno do výzkumného střediska AdMas.

4.4.2. *Betonáž*

Betonáž byla provedena dne 14.10.2016 v prostorách výzkumného střediska AdMas. Beton byl vyroben v betonárně a dopraven do střediska v mixu neboli autodomíchávači. Zde proběhlo odlití do bednění s osazenými armokoši a do forem pro výrobu doprovodných těles.

Hutnění bylo v případě zkušebních prvků provedeno pomocí ponorného vibrátoru, a v případě doprovodných těles na vibračním stole. Vrchní strana zkušebních prvků byla zarovnána do hladkého vzhledu.



Obrázek 4-1 Betonáž zkušebních prvků

4.4.3. *Ošetřování betonu*

Vybetonované prvky byly po dobu jednoho týdne přikryty igelitovou folií a ošetřovány vodou, aby nedocházelo ke ztrátám vlhkosti. Poté byly převezeny zpět do laboratoří Ústavu stavebního zkušebnictví, kde dozrály, a následně byly provedeny potřebné zkoušky.

4.5. DODATEČNÉ ZESÍLENÍ PRVKU

4.5.1. *Prvky použité pro zesílení*

Lepidlo

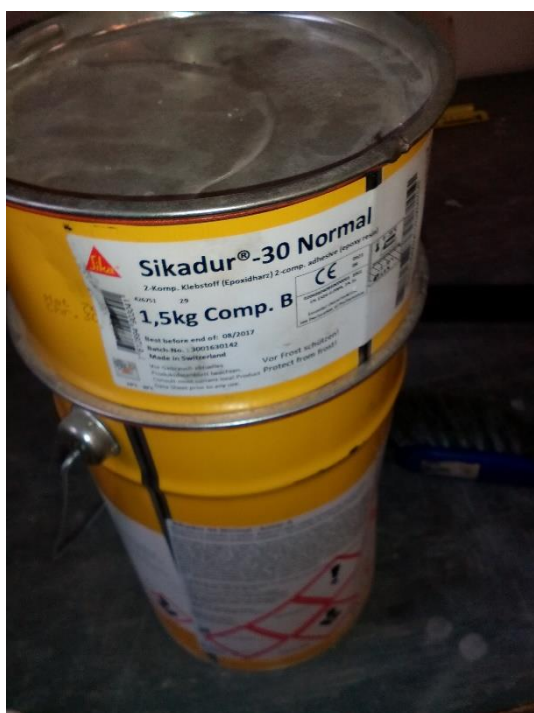
Pro aplikaci uhlíkové lamely na povrch betonu se používají speciální lepidla, nejčastěji dvousložkové epoxydové pryskyřice. Obě složky tohoto lepidla se musí zamíchat v předepsaném poměru, aby lepidlo dosahovalo požadovaných vlastností. Lepidlo se pak nanáší na plochu lamely rovnoměrně, tím je pak také napětí ve spoji rozloženo rovnoměrně.

V našem případě jsme použili lepidlo Sikadur® -30 Normal. Sikadur® -30 Normal je 2komponentní tixotropní lepicí hmota, na bázi kombinace epoxidových pryskyřic a speciálních plniv, navrženo pro aplikace za normálních teplot $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$. Lepidlo je vhodné pro lepení systému zesilování, zvláště v oblasti konstrukčního zesilování. [4-7]

Mezi vlastnosti lepidla patří[4-7]:

- Snadná zpracovatelnost, jednoduchý poměr míchání
- Vysoká odolnost proti tečení
- Vysoká odolnost proti teplotám
- Vysoká přilnavost na beton a další stavební materiály, a na uhlíkové lamely
- Vysoká mechanická pevnost
- Tixotropní – tj. nestéká, použitelnost na svislých stěnách a nad hlavou
- Vytvrzení i při nízkých teplotách vzduchu, a i při vysoké vlhkosti vzduchu

- Lze nanášet i na matný a vlhký podklad
- Nesmršťuje se při vytvrzení
- Vysoké počáteční a konečné pevnosti
- Vysoká odolnost proti otěru a rázům
- Nepropustné pro vodu a vodní páru
- Obě dvě složky jsou barevně rozlišitelné, lze tak dobře kontrolovat homogenitu směsi



Obrázek 4-1 Lepidlo Sikadur 30 Normal



Obrázek 4-2 Nanášení lepidla na lamelu

Uhlíková lamela

Použitá uhlíková lamela CFK typ 50 má rozměry průřezu $50 * 1,2$ mm. Délka lamely byla zvolena 2000 mm, aby nedocházelo ke kolizi s podporami. Vlastnosti uhlíkových lamel jsou popsány v kapitole 3.4.

Vlastnosti lamely CFK typ 50[4-8](*hodnota z [3-2]):

Objemová hmotnost	1600 kg/m ³
Porovnání rozměrů pro stejný účinek	50*1,2 mm
Porovnání hmotnosti pro stejný účinek	96 g/bm
Zachycení sil	Jen v podélném směru
Délka	2000 mm
Pevnost v tahu	2400 MPa
Modul pružnosti v tahu*	165 000 MPa
Stavební výška	velmi malá
Odolnost proti únavě	vynikající
Materiálové náklady	vysoké
Pracnost	nízká



Obrázek 4-3 Uhlíková lamela CFK typ 50



Obrázek 4-4 Vyvození přitlaku při lepení lamely

4.5.2. Zesílení prvku pomocí CFK lamely

Postup lepení lamely na prvek[4-8][3-2]:

1.) Příprava lamely – nařezání na potřebnou délku na elektrické pile, úprava a zabroušení konců, očištění lamely od nečistot

- 2.) Příprava betonového podkladu – obroušení povrchové vrstvy bruskou, zdrsnění povrchu, odstranění prachových částic a nečistot
- 3.) Příprava lepidla – smíchání přesného poměru obou složek
- 4.) Nanesení lepidla – rovnoměrně rozetření po povrchu lamely
- 5.) Aplikace lamely na zkušební prvek – lamela je prostě přitisknuta a dotlačena od středu ke krajům z důvodu odstranění vzduchu
- 6.) Dokončovací práce – vizuální kontrola, odstranění přebytečného lepidla vytlačeného přitisknutím, zakrytí igelitovou folií a přitížení pomocí svěrek



*Obrázek 4-5 Nalepená CFK lamela
včetně odporového tenzometru*

5. LABORATORNÍ ZKOUŠKY PRO ZJIŠTĚNÍ MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ BETONU A OCELI

Před samotným zahájením doprovodných zkoušek byly změřeny rozměry všech těles, a následně byla tělesa také zvážena. Z toho byla vypočtena objemová hmotnost:

$$\rho = m/V \text{ [kg/m}^3\text{]},$$

kde m je hmotnost tělesa

V je objem tělesa

Objemové hmotnosti jsou vyhodnoceny v příloze.

5.1. PEVNOST BETONU V TLAKU [1-3]

Pevnost betonu v tlaku je jeho nejdůležitější vlastností. Vyjadřuje odolnost betonu proti jeho porušení a proti změně tvaru při působení vnějšího zatížení. Pevnost dělíme na technickou a statistickou. Technická pevnost je zjišťována pomocí experimentu, a statistická pevnost je dána na základě teorie pravděpodobnosti a zajišťuje spolehlivost konstrukce.

Beton se podle pevnosti rozlišuje do pevnostních tříd, které jsou uvedeny v normě ČSN EN 206. Zde jsou uvedeny charakteristické válcové a krychelné pevnosti v tlaku betonu stáří 28 dní. Charakteristická pevnost v tlaku je pevnost, pro kterou jsou očekávané nižší hodnoty pevností nejvýše u 5 % základního souboru všech možných výsledku hodnocených pevností.

Pevnost betonu se určuje na krychlích, válcích a hranolech. Vzájemný poměr pevnosti krychelné, válcové a hranolové je 1:0,75-0,8:0,7-0,83.

Zkouška pevnosti v tlaku spočívá v zatížení těles tlakem v laboratorním lise až do úplného porušení. Na krychlích byla zjišťována krychelná pevnost

$f_{c,cube}$ a na hranolech hranolová pevnost $f_{c,prism}$. Obě pevnosti se určí stejně, a to poměrem maximální dosažené síly a zatěžované plochy tělesa.

$$f_c = F/A_c \text{ [N/mm}^2 \text{ = MPa]},$$

kde F je zatížení působící na těleso [N]

A_c je plocha tělesa, na kterou zatížení působí [mm²]

Takhle stanovená pevnost v tlaku je považována za pevnost technickou.

Stanovení pevnost v tlaku

Pevnosti v tlaku byly stanoveny na 6 krychlích o hraně 150 mm a 3 hranolech o rozměrech 100*100*400 mm. Tělesa byla postupně vkládána do laboratorního lisu FORMTEST centricky mezi tlačné desky a zatěžována postupně přibývajícím tlakem až do porušení. Vyhodnocení a výsledky zkoušky jsou uvedeny v příloze P1.



Obrázek 5-1 Zkušební krychle v laboratorním lisu před zkouškou



Obrázek 5-2 Zkušební krychle v laboratorním lisu po zkoušce

5.2. STATICKÝ MODUL PRUŽNOSTI BETONU[1-6]

Statický modul pružnosti betonu v tlaku je další důležitou vlastností betonu. Jedná se o významnou pružnostní charakteristiku, která vyjadřuje deformační vlastnosti materiálu. Jeho zjišťování probíhá na základě měření deformací, které nastávají při známém zatížení. Využívá se přitom Hookova

zákona při jednoosé napjatosti, podle kterého je napětí dáno součinem modulu pružnosti a poměrného přetvoření:

$$\sigma = E * \varepsilon \text{ [N/mm}^2 = \text{MPa]},$$

kde E je modul pružnosti v tlaku $\text{[N/mm}^2 = \text{MPa]}$

ε je poměrné přetvoření $\text{[}\mu\text{mm/mm]}$

Statický modul betonu pak určujeme ze vztahu:

$$E_c = \Delta\sigma / \Delta\varepsilon \text{ [MPa]},$$

kde $\Delta\sigma$ je rozdíl mezi tzv. horním a základním napětím

$\Delta\varepsilon$ je změna poměrného přetvoření mezi horním a základním napětím $\text{[}\mu\text{mm/mm]}$

Rozdíl mezi horní a základní hladinou napětí je

$$\Delta\sigma = \sigma_a - \sigma_b \text{ [MPa]},$$

kde σ_a je horní napětí $\text{[N/mm}^2 = \text{MPa]}$

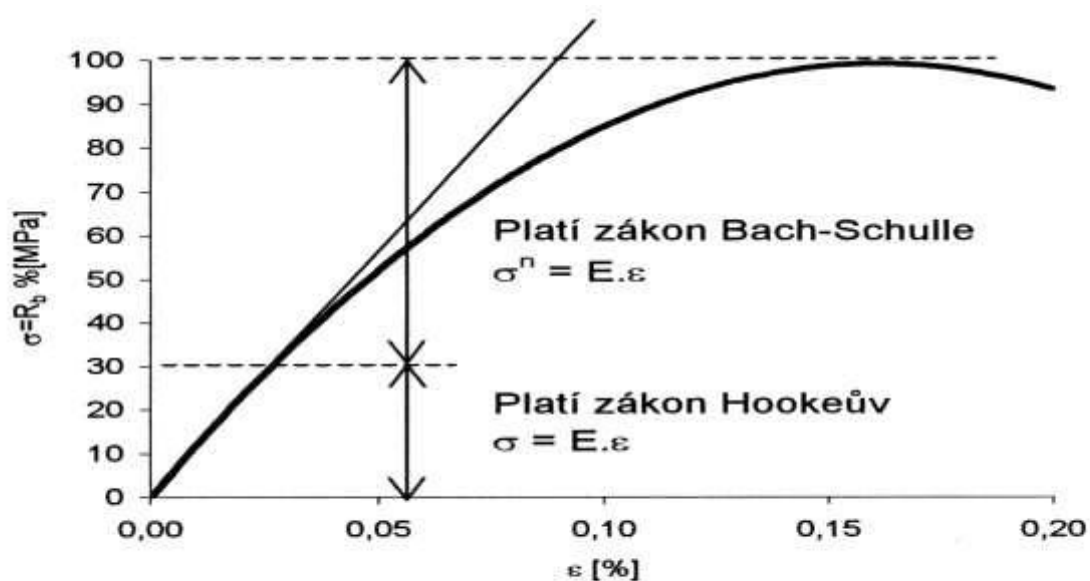
σ_b je základní napětí $\text{[N/mm}^2 = \text{MPa]}$

Zkušební těleso zatěžujeme v lise tlakem a při tom měříme jeho deformace.

Základní hladina napětí je vždy určena jako $0,5 \text{ N/mm}^2$. Z toho je určena základní zatěžovací síla pomocí vztahu $F_b = 0,5 * A$, kde A je tlačná plocha tělesa. Horní napětí je určeno jako maximální napětí v betonu, při kterém ještě platí Hookův zákon. Z deformačního diagramu vyplývá, že je to jedna třetina hranolové pevnosti betonu v tlaku.

$$\sigma_a = f_{c,\text{prism}}/3 \text{ [N/mm}^2 = \text{MPa]},$$

kde $f_{c,\text{prism}}$ je hranolová pevnost zkušebního tělesa v tlaku $\text{[N/mm}^2 = \text{MPa]}$



Obrázek 5-3 Pracovní diagram betonu při namáhání v tlaku [4-5]

Měření poměrné deformace je prováděno pomocí tenzometrů. Ty se dělí na mechanické, strunové a odporové. Při měření tenzometrem jde vždy o určení relativní změny vymezené části objektu, tedy o změnu měřící základny L , která je určena pomocí dvou dotykových břitů. Tato změna základny je měřena na základě změny celkové vzdálenosti dotykových břitů. Poměr této změny a délky základny dává poměrné deformace:

$$\varepsilon = \Delta L / L \text{ [}\mu\text{mm/mm]},$$

kde ΔL je změna délky měřící základny [μmm]

L je délka měřící základny, vymezená břity [mm]

Centrování zkušebního tělesa

napětí [N/mm²]

čas

60 s

60 s

----- základní

--- horní

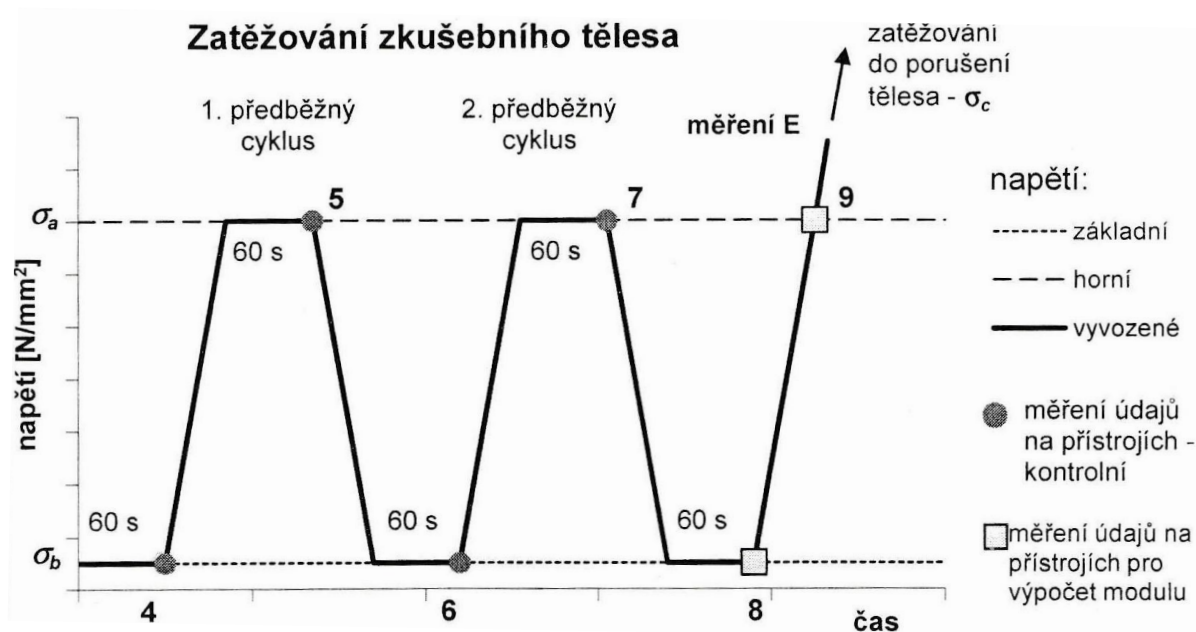
— vyvozené

● měření údajů na přístrojích (max. 30 s)

Stanovení modulu pružnosti v tlaku

Laboratorní lis FORMTEST byl pomocí sběrnice dat připojen k počítači, na kterém se pomocí speciálního programu FORMTEST zaznamenával čas, síla a změna měřící základny. Díky tomu nebylo třeba do měření nijak zasahovat.

Tento laboratorní lis rovněž neumožňuje ověřit centrování tělesa, proto bylo přistoupeno rovnou k měření.



Obrázek 5-5 Časový průběh zatěžování zkušební tělesa [2-5]

Samotné měření se skládalo ze dvou předběžných cyklů, při kterých bylo vyvozeno základní napětí, které bylo podrženo po dobu 60 s, a následně se napětí plynule zvyšovalo na hodnotu horního napětí, kde bylo podrženo po dobu 60 s. Poté bylo těleso odtíženo na základní napětí a cyklus se ještě jednou zopakoval. Následoval měřený zatěžovací cyklus, při kterém bylo těleso zatíženo základním napětím, které bylo podrženo po dobu 60 s, následně bylo napětí plynule zvýšeno na hodnotu horního napětí, a poté ihned odtíženo. Z hodnot napětí a deformací při měřeném cyklu byl následně vypočten modul pružnosti pro všechna 3 tělesa.

Vyhodnocení naměřených dat a určení modulu pružnosti je uvedeno v příloze P1.



*Obrázek 5-6 Měření modulu pružnosti
v tlaku v laboratorním lisu FORMTEST*

5.4. TAHOVÁ ZKOUŠKA OCELI [1-7]

Nejdůležitější vlastností betonářské oceli je její tahová pevnost. Ta udává odolnost oceli proti namáhání tahovou silou. Tato vlastnost je výrazně ovlivňována okolní teplotou. Tahová pevnost začíná klesat od 300 °C, při teplotě nad 500 °C je zhruba poloviční a rovněž se vytrácí mez kluzu. Při opakovaném namáhání rovněž klesá tahová pevnost až na hodnotu tzv. únavové pevnosti. Pevnost oceli je rovněž ovlivněna obsahem uhlíku, při větším obsahu uhlíku je pevnost větší.

Tažnost oceli je dána prodloužením délky před přetržením. Tažnost oceli se stoupajícím obsahem uhlíku klesá.

Tahová zkouška oceli probíhá v tahovém zařízení, ve kterém je uchycena ocelová tyč (betonářská výztuž). Tyč je deformována tahovým zatížením

obvykle až do přetržení. Výstupem zkoušky je pracovní diagram oceli, ze kterého se následně určují mez kluzu a mez pevnosti.

Mez kluzu je bod, při kterém dochází ke kluzovému jevu – ocel se začíná plasticky prodlužovat bez nárůstu síly. Ocel může mít výraznou mez kluzu, která je v grafu vyjádřena, a má horní a dolní mez. Ocel může mít také smluvní mez kluzu, která je určena z grafu přibližně při hodnotě jisté dohodnuté trvalé deformace, která činí 0,2 %. Mez kluzu se určí ze vztahu:

$$f_{yk}(f_{0,2}) = F_y / A_s \quad [\text{MPa} = \text{N/mm}^2]$$

kde F_y je hodnota tahové síly na mezi kluzu [N]

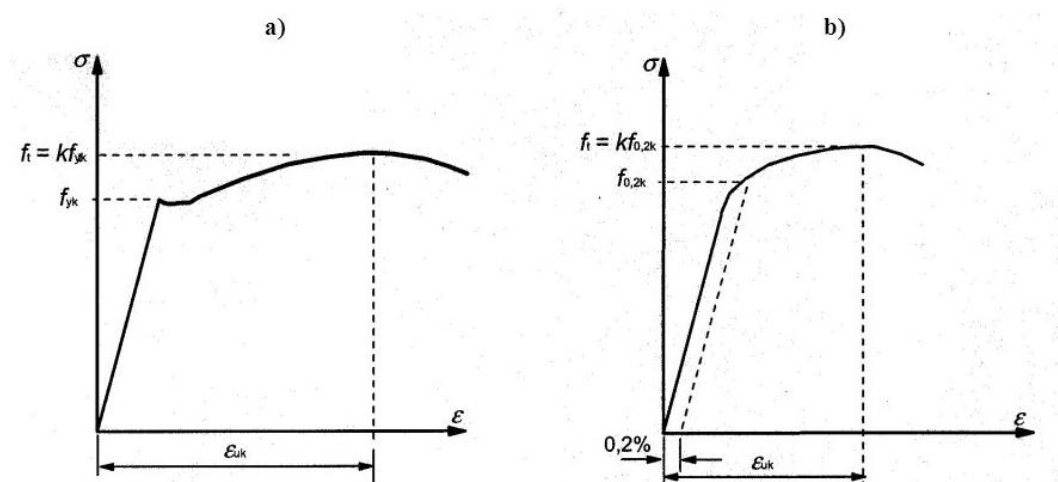
A_s je plocha zkoušeného prutu [mm^2]

Mez pevnosti je napětí odpovídající maximální síle, která je dosažena při zkoušení vzorku betonářské výztuže, než dojde k porušení celistvosti materiálu. Mez pevnosti se určí ze vztahu:

$$f_u = F_{\text{MAX}} / A_s \quad [\text{MPa} = \text{N/mm}^2]$$

kde F_{MAX} je maximální hodnota tahové síly [N]

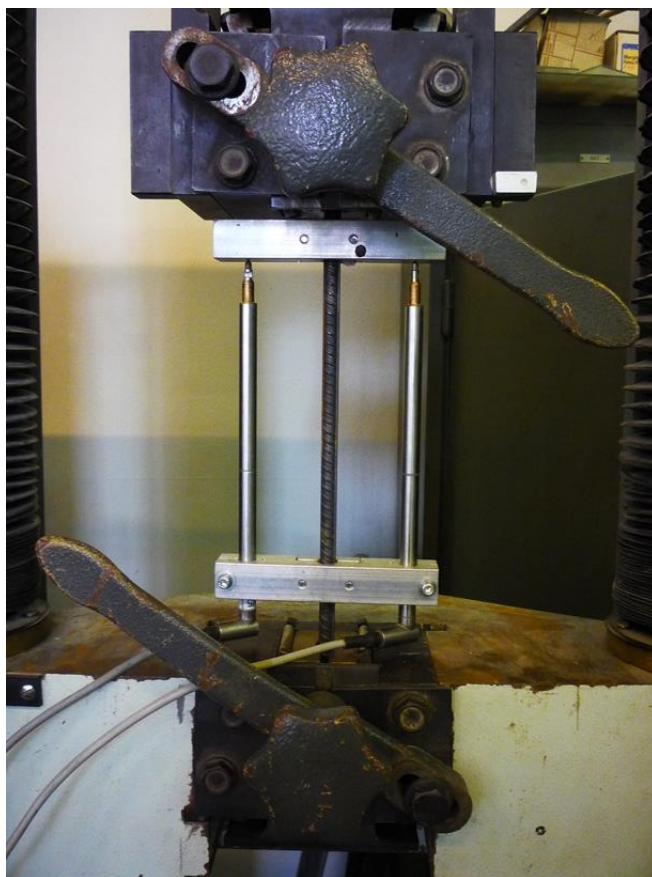
A_s je plocha zkoušeného prutu [mm^2]



Obrázek 5-1 Pracovní diagram oceli a) s výraznou mezí kluzu f_{yk} , b) se smluvní mezí kluzu $f_{0,2k}$ [4-4]

Stanovení pevnosti oceli v tahu

Armokoš zkušebního prvku byl zhotoven ze dvou průměrů výztuže – 10 mm a 6 mm. Od každého průměru byly použity tři reprezentativní vzorky pro tahovou zkoušku. Tyto byly postupně uchycovány do lisu s osazenými indukčnostními snímači dráhy do zkušebních přípravků a jednotlivě zkoušeny. Před zkoušením byla změřena počáteční délka L_0 a poté byly vzorky zatěžovány konstantní tahovou silou až do porušení. Poměrné přetvoření bylo měřeno indukčnostními snímači, které posílaly data do měřicí centrály HBM Spider 8, která zaznamenávala data s frekvencí 5 Hz. Vyhodnocení dat proběhlo v tabulkovém editoru. Z dat byla určena mez kluzu, pevnost v tahu a modul pružnosti oceli. Dále byly vytvořeny pracovní diagramy oceli. Vyhodnocení je uvedeno v příloze P1.



Obrázek 5-2 Tahová zkouška oceli v trhacím lisu

6. EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA

6.1. LABORATORNÍ ZKOUŠENÍ NEZESÍLENÉHO PRVKU

Příprava laboratorní zatěžovací zkoušky

Pro experimentální analýzu musely být oba zkušební prvky přemístěny do laboratoře Ústavu stavebního zkušebnictví, která má potřebné vybavení. Nejprve byly na místo umístěny podporové stolice. Na tyto pak bylo možno umístit podpory, představující uložení prostého nosníku. Na jedné straně byla vytvořena pevná podpora, na druhé straně posuvná podpora. Obě podpory byly opatřeny podložkami pro vyrovnaní nerovností. Podpora byla vždy, dle návrhu, situována 100 mm od okraje nosníku.

Zatížení působící na nosník bylo realizováno pomocí hydraulického válce s maximální silou 250 kN, který byl připevněný k zatěžovacímu ocelovému rámu osazeného na lámací dráze. Síla z válce byla rovnoměrně rozdělena do dvou silových složek využitím ocelového příčnicku (H profil), čímž byl realizován čtyřbodový ohyb.

Rozmístění snímačů

Pro měření průhybů a poměrných přetvoření byly na prvek umístěny snímače a tenzometr:

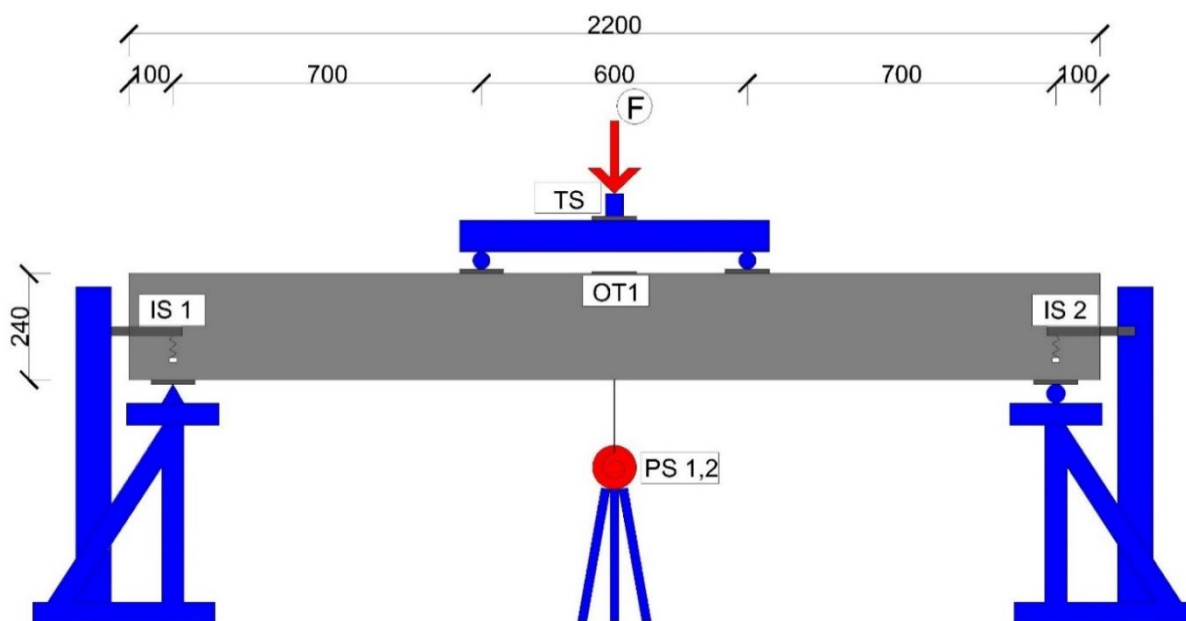
- pro měření síly v hydraulickém válci byl osazen tenzometrický siloměr CSP 25t.
- pro měření svislého průhybu byly doprostřed nosníku osazeny dva potenciometrické snímače dráhy MS 04, a to jeden na každou stranu
- pro měření poklesu podpor byl nad každou podporu osazen indukčnostní snímač, a to do kříže pro přesnější výsledek

- pro měření poměrného přetvoření v horních vláknech betonu byl použit odporový tenzometr HBM 1-LY41-100/120, přilepený pomocí lepidla HBM X60.

Snímače byly po osazení zapojeny do sběrnice HBM QuantumX. Z té se pak data přenášela do notebooku se speciálním softwarem, Data byla snímána s frekvencí 5 Hz.



Obrázek 6-1 Uložení prvku a osazení snímačů - nezesílený prvek



Obrázek 6-2 Schéma rozmístění snímačů nezesíleného prvku

<i>Legenda:</i>	<i>TS</i>	<i>hydraulický válec s tenzometrickým snímačem</i>
	<i>OT1</i>	<i>odporový tenzometr 1 měřící přetvoření betonu</i>
	<i>PS1,2</i>	<i>potenciometrické snímače dráhy průhybu prvku</i>
	<i>IS1,2</i>	<i>indukčnostní snímače dráhy posunu v podporách</i>

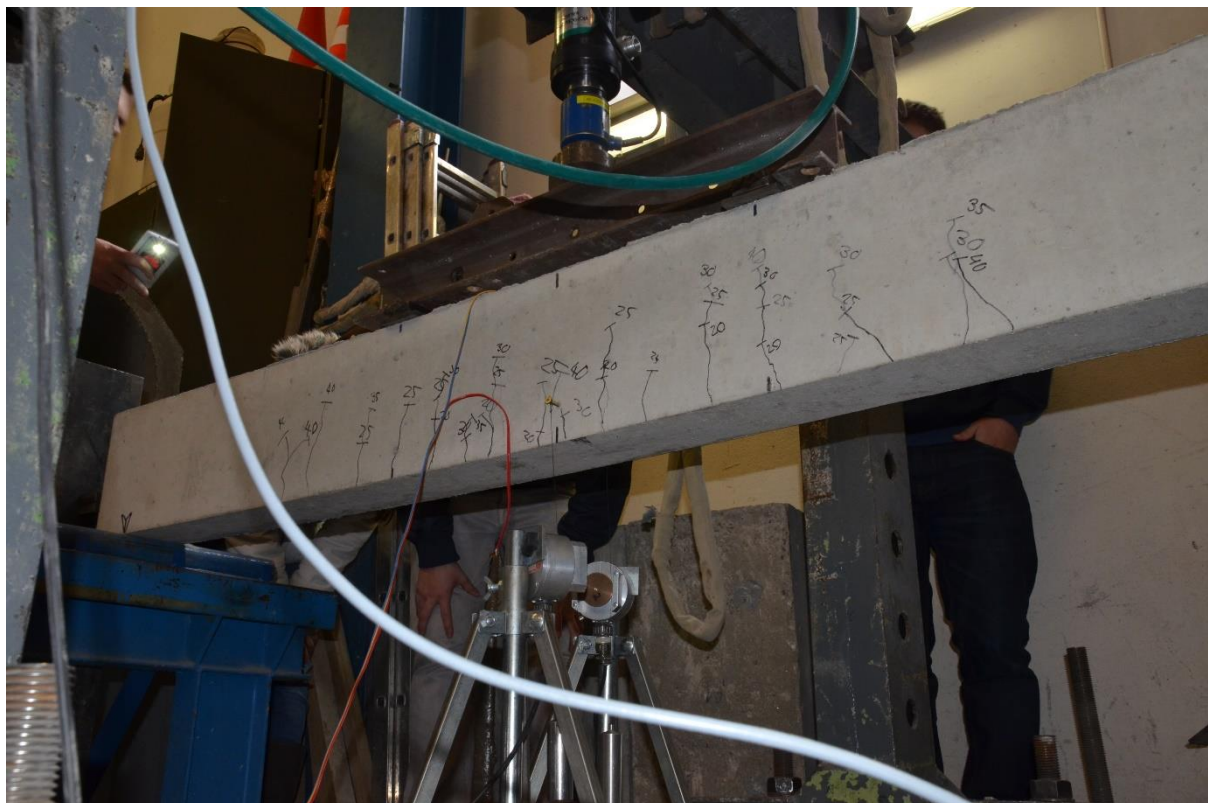
Průběh experimentální analýzy

Experimentální analýza nezesíleného prvku byla provedena dne 11.11.2016, tedy 28 dní po jeho vybetonování, po vyzrání hotového betonu. Zatěžovací zkouška byla provedena přitěžováním pomocí zatěžovacího válce, a to s postupným zatěžováním po 5 kN. Po každém přitížení o 5 kN byl vizuálně zkontrolován povrch prvku, zda se nevyskytují trhliny. První pozorovatelné trhliny vznikly při síle 20 kN. Následně byly trhliny na prvku zvýrazňovány a byla u nich uvedena síla, při které vznikly.

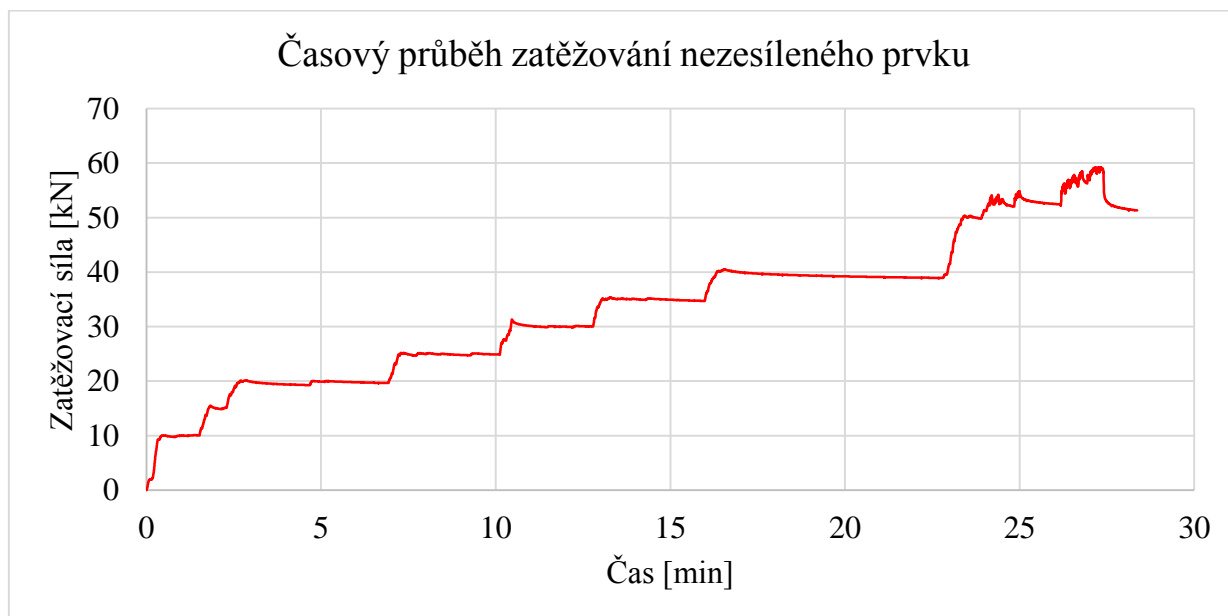
Při dosažení síly 60 kN byly snímače z prvku odebrány, aby nedošlo k jejich poškození. V poslední fázi byl prvek zatěžován po přírůstcích 10 kN. Následně byl prvek zatěžován až do porušení, ke kterému došlo v horních vláknech vlivem vybočení tlačené výztuže a rozdrčení tlačného betonu.

Průběh zatěžování nezesíleného prvku:

- 1.)Spuštění válce na ocelový H-profil pro přímý kontakt s prvkem
- 2.)Začátek zatěžování s přírůstkem po $\Delta F = 5$ kN
- 3.)Vznik prvních trhlin při $F = 20$ kN v tažené části
- 4.)Konec vzniku nových trhlin, pouze rozšiřování stávajících trhlin při $F = 30$ kN
- 6.)Odstranění měřících zařízení při síle $F = 60$ kN
- 7.)Při dalším zatěžování po $\Delta F = 10$ kN vykazuje prvek plastické chování - dochází jen k nárůstu deformací bez přírůstkem síly – plastické deformace betonářské výztuže
- 8.)Konec zkoušky nezesíleného prvku – dosažení meze únosnosti - vybočení tlačné výztuže, rozdrčení tlačného betonu v horních vláknech



Obrázek 6-1 Trhliny v nezesíleném prvku



Graf 6-1 Časový průběh zatěžování nezesíleného prvku

Závislost průhybu uprostřed rozpětí prvku na síle, závislost průhybů na čase, závislost zatěžovací síly na poměrné deformaci při experimentální analýze nezesíleného prvku je uvedeno v příloze P4.

6.2. LABORATORNÍ ZKOUŠENÍ ZESÍLENÉHO PRVKU

Příprava laboratorní zatěžovací zkoušky

Druhý zkušební prvek byl externě zesílen CFK lamelou – viz kapitola 4.5. Zatěžovací schéma bylo shodné se zatěžovacím schématem nezesíleného prvku, při kterém byl vyvozen čtyřbodový ohyb.

Rozmístění snímačů

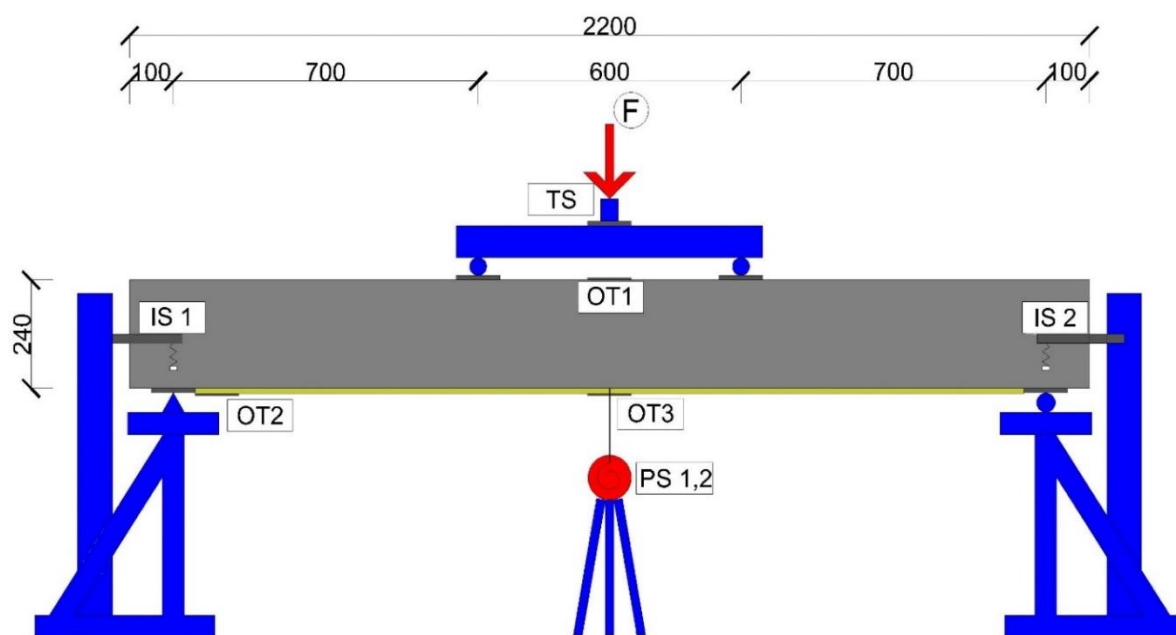
Po usazení prvku byly na prvek umístěny snímače stejně, jako v případě nezesíleného prvku. Navíc se přidaly dva odporové tenzometry:

-pro měření poměrné deformace na externí uhlíkové lamely byly umístěny dva tenzometry HBM 1-LY11-10/350, a to doprostřed a na kraj uhlíkové lamely.



Obrázek 6-4 Uložení prvku a osazení snímačů - zesílený prvek

Snímače byly poté zapojeny do sběrnice HBM QuantumX a data byla posílána s frekvencí 5 Hz do notebooku se speciálním softwarem, jako v případě nezesíleného prvku.



Obrázek 6-5 Schéma rozmístění snímačů zesíleného prvku

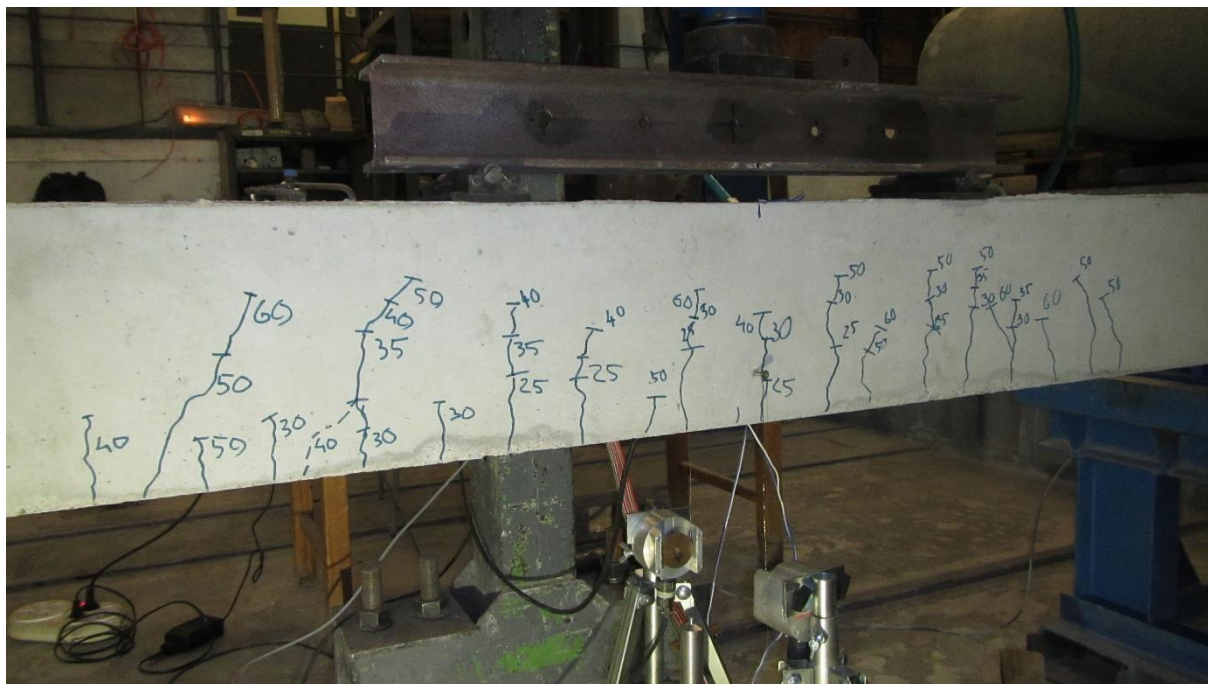
- Legenda:*
- | | |
|----------------|--|
| <i>TS</i> | <i>hydraulický válec s tenzometrickým snímačem</i> |
| <i>OT1,2,3</i> | <i>odporový tenzometr měřící přetvoření betonu (1),
přetvoření kraje lamely (2), přetvoření uprostřed
lamely (3)</i> |
| <i>PS1,2</i> | <i>potenciometrické snímače dráhy průhybu prvku</i> |
| <i>IS1,2</i> | <i>indukčnostní snímače dráhy posunu v podporách</i> |

Průběh experimentální analýzy

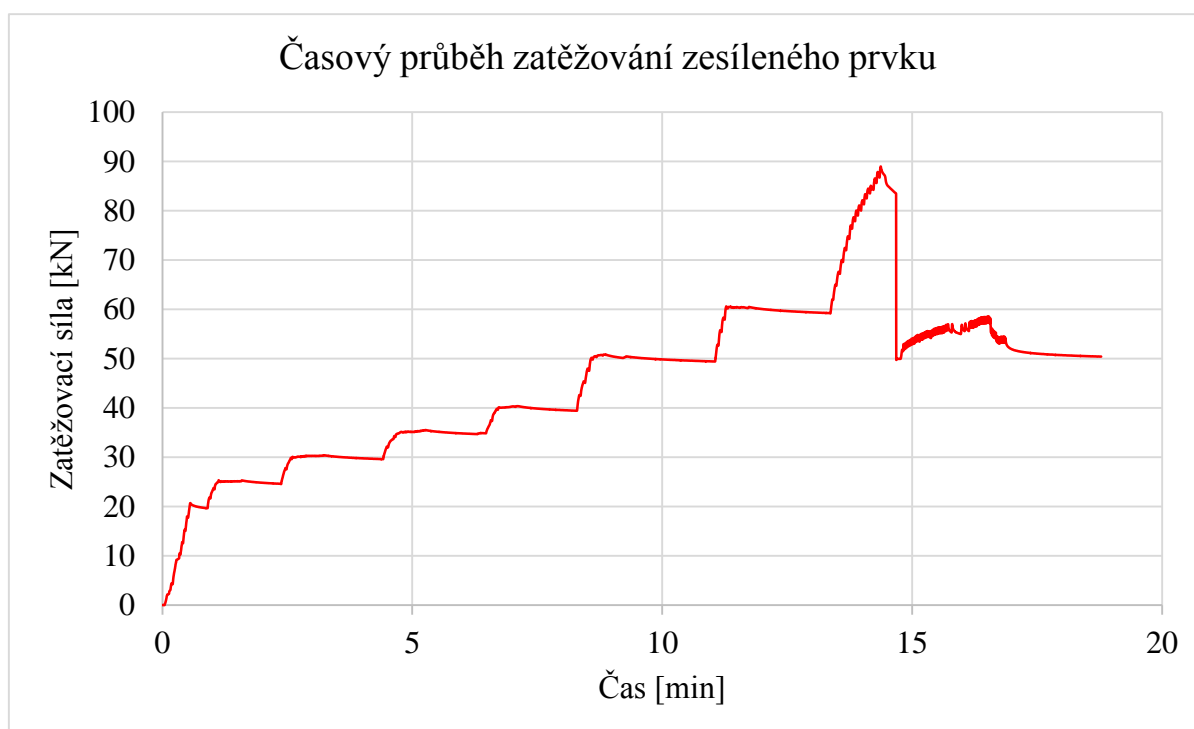
Experimentální analýza zesíleného prvku proběhla dne 25.11.2016. Průběh zatěžování byl shodný s průběhem zatěžování nezesíleného prvku – tj. přes hydraulický válec po přírůstcích 5 kN. Při zkoušce byly rovněž vizuálně pozorovány a zakreslovány trhliny, včetně zatížení, při kterém vznikly. První pozorovatelné trhliny vznikly při síle 25 kN. Prvek byl dále přitěžován, až došlo k náhlému odtržení povrchové vrstvy betonu a CFK lamely, po kterém výrazně klesla zatěžovací síla.

Průběh zatěžování zesíleného prvku:

- 1.)Spuštění hydraulického válce na H profil pro přímý kontakt s prvkem
- 2.)Začátek zatěžování s přírůstkem po $\Delta F = 5$ kN
- 3.)Vznik prvních trhlin při $F = 25$ kN v tažené části
- 4.)Vznik trhlin v oblasti namáhané smykem při $F = 30$ kN
- 5.)Konec vzniku nových trhlin, pouze rozšiřování stávajících trhlin při $F = 50$ kN
- 6.)Dosažení maximálního zatížení $F = 89$ kN, následné snižování zatěžovací síly
- 7.)Delaminace – odtržení povrchové vrstvy a uhlíkové lamely při $F = 83$ kN. Smykové napětí v povrchové vrstvě betonu dosáhlo kritické hodnoty a tato vrstva se vylomila z betonu.
- 7.)Pokles zatěžovací síly F na 50 kN, výrazný pokles průhybu
- 7.)Při dalším zatěžování dochází pouze k nárůstu průhybu a rozšiřování trhlin – plastické chování prvku
- 8.)Konec zatěžovací zkoušky zesíleného prvku – rozdrčení horních tlačných vláken, vybočení tlačené výztuže



Obrázek 6-6 Trhliny v zesíleném prvku



Graf 6-2 Časový průběh zatěžování zesíleného prvku

7. NUMERICKÁ ANALÝZA

Numerická analýza byla provedena v programu ATENA 2D, který slouží pro reálnou simulaci porušení betonových a železobetonových konstrukcí. Zde byl vytvořen matematický model provedené zkoušky. Výsledky numerické analýzy byly porovnány s experimentální analýzou a statickým výpočtem.

7.1. ZÁKLADNÍ INFORMACE [2-8]

Autoři programu Atena 2D jsou V. Červenka, R. Pukl a J. Margoldová. Software ATENA 2D pracuje s materiálovým chováním nelineárního porušení betonu. Program obsahuje konstitutivní model betonu založený na modelu rozetřené trhliny. Využívá deformační variantu metody konečných prvků.

Numerický výpočet sestává ze tří částí:

- Základní vztahy definující chování materiálu – vztahy mezi napětím a přetvořením
- Postup metodou konečných prvků, diskretizace pole přetvoření (uzlové posuny)
- Řešení nelineárního problému pomocí souboru následných lineárních řešení

7.2. ŘEŠENÍ MODELU

7.2.1. *Topologie*

Program ATENA 2D využívá pro nelineární analýzu dvě metody – Newton-Raphson a Arc-Length.[2-8] Pro náš model byla zvolena metoda Newton-Raphson.

Topologie prvku byla vytvořena v programu AutoCAD 2015 a jako soubor *.dxf byla importována do ATENY 2D. Jednotlivým uzavřeným částem pak byly přiděleny příslušné materiály.

Modelování experimentu probíhalo jak pro prvek nezesílený, tak pro prvek zesílený externí lepenou výztuží. Materiál pro betonový nosník byl zvolen z nelineárního betonu SBETA. V tabulce jsou zadány materiálové vlastnosti betonu, které byly zjištěny pomocí doprovodných zkoušek nebo z jiných zdrojů.

Tabulka 7-1 Použité reálné vlastnosti betonu (hodnoty z jiných zdrojů)*

Vlastnost	Označení	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti	E_c	27500	MPa
Pevnost v tlaku	R_{cu}	48,5	MPa
Pevnost v tahu*	R_c	3,19	MPa
(Specifická) Objemová hmotnost	ρ	2250	kg/m ³
Specifická lomová energie*	G_f	79,8	N/m

Externí lepená uhlíková výztuž byla modelována z 3D bilineární oceli Von Mises. Hodnoty charakteristik uhlíkové výztuže byly zadány dle skutečných vlastností, udávaných výrobcem. Z důvodu reálnější simulace experimentu byla výška lamely zadána jako 10 mm namísto skutečných 1,2 mm. Poměrem ploch byl pak vynásoben modul pružnosti externí výztuže, pro zachování tuhosti.

Tabulka 7-2 Použité reálné vlastnosti CFK lamel

Vlastnost	Označení	Hodnota	Jednotky
Objemová hmotnost	ρ	1600	kg/m ³
Pevnost v tahu	R_c	2400	MPa
Modul pružnosti	E	165000	MPa

Ocelová výztuž byla modelována pomocí materiálu výztuž, typ multilineární. Pracovní diagram oceli byl pro jednotlivé druhy výztuže upraven

dle reálného průběhu grafu z tahových zkoušek výztuže. Průměry a vlastnosti výztuže se zadávaly na základě toho, zda se jedná o horní tlakovou výztuž, dolní tahovou výztuž nebo třmínky.

Tabulka 7-3 Použité reálné vlastnosti ocelové výztuže průměru 10 mm

Vlastnost	Označení	Hodnota	Jednotky
Objemová hmotnost	ρ	7850	kg/m ³
Modul pružnosti	E	199,4	GPa
Mez kluzu	f_y	619	MPa
Mez pevnosti	f_u	712,9	MPa

Tabulka 7-4 Použité reálné vlastnosti ocelové výztuže průměru 6 mm

Vlastnost	Označení	Hodnota	Jednotky
Objemová hmotnost	ρ	7850	kg/m ³
Modul pružnosti	E	202,3	GPa
Mez kluzu	f_y	595,2	MPa
Mez pevnosti	f_u	630,5	MPa

Do modelu byly rovněž vloženy podložky pro lepší roznos zatížení v místě podpor a v místě zatěžování. Pro tyto podložky byl použit materiál 3D bilineární ocel Von Mises.

Pro makroprvky byla zvolena čtyřúhelníková síť konečných prvků o délce strany prvku 0,02 m. Tohle dělení zajišťuje poměrně uspokojivou přesnost řešení.

7.2.2. Zatížení a podpory

Dále byly nadefinovány tři zatěžovací stavy, které pak byly postupně zařazovány do jednotlivých výpočtových kroků. Jedná se o tyto ZS:

- 1.ZS – Podpory – definování pevné a posuvné podpory v příslušných styčnicích

2.ZS – Vlastní tíha zkušebního prvku

3.ZS – Síla – přírůstek síly o hodnotě $-0,001 \text{ MN}$ (-1 kN) ve styčnicích, kde probíhalo zatěžování

7.2.3. Výpočet

Po vytvoření modelu a zatěžovacích stavů byly na prvek umístěny monitorovací body, obdobně jako při experimentální analýze:

1.MB – External forces, Component 2, v místě zatěžování

2.MB – External forces, Component 2, v místě zatěžování

3.MB – Displacement, Component 2, uprostřed rozpětí nosníku

4.MB – Total element initial stress, Component 1, uprostřed rozpětí v tlačené oblasti

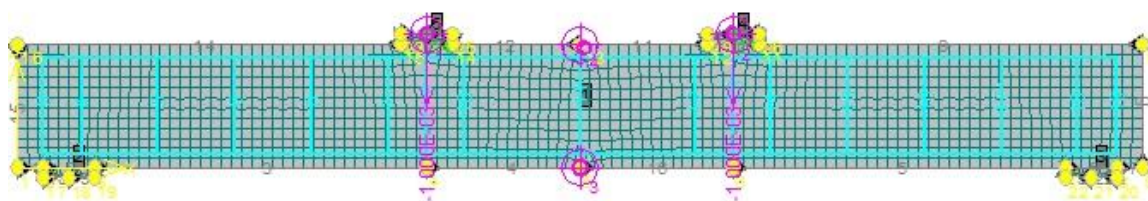
Dále byly vytvořeny výpočtové kroky s ohledem na průběh zatěžování při experimentální analýze:

1.krok – $1.ZS + 2.ZS$

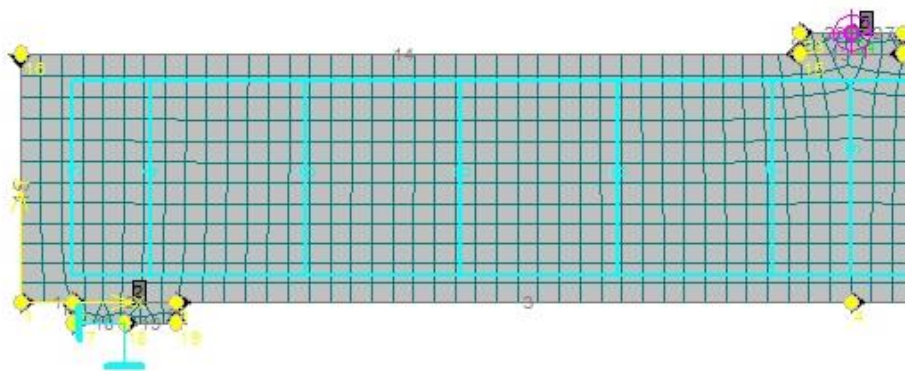
2.krok – $(n+1) \text{ krok.} - 1.ZS + n*3.ZS$

7.2.4. Grafické zobrazení modelu

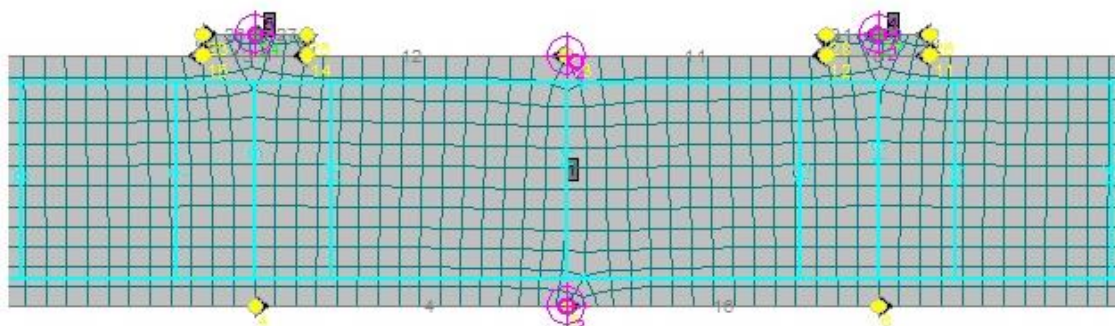
Nezesílený prvek:



Obrázek 7-1 Model nezesíleného prvku - celkový pohled



Obrázek 7-2 Model nezesíleného prvku - detail ZS1 - levá podpora



Obrázek 7-3 Model nezesíleného prvku - detail monitorovacích bodů

Legenda: 1 – MB1 – síla

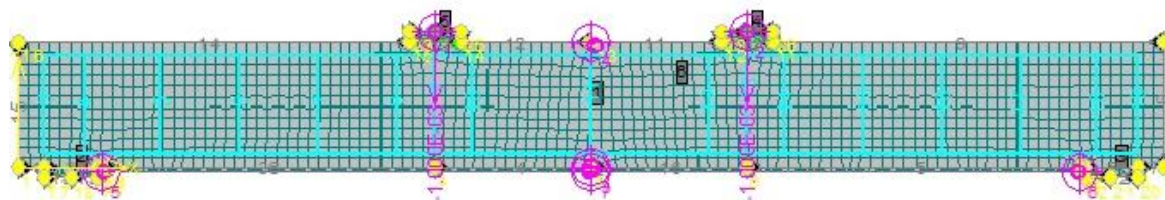
2 – MB2 – síla

3 – MB3 – deformace

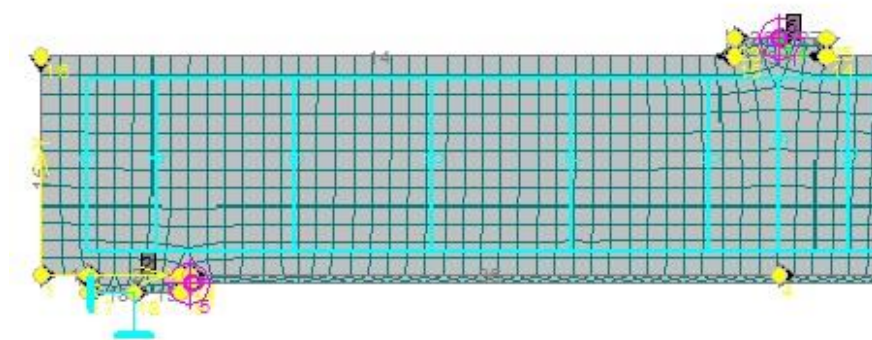
4 – MB4 – napětí v betonu

1,000E-0,03 – zatěžovací stav 3 - síla

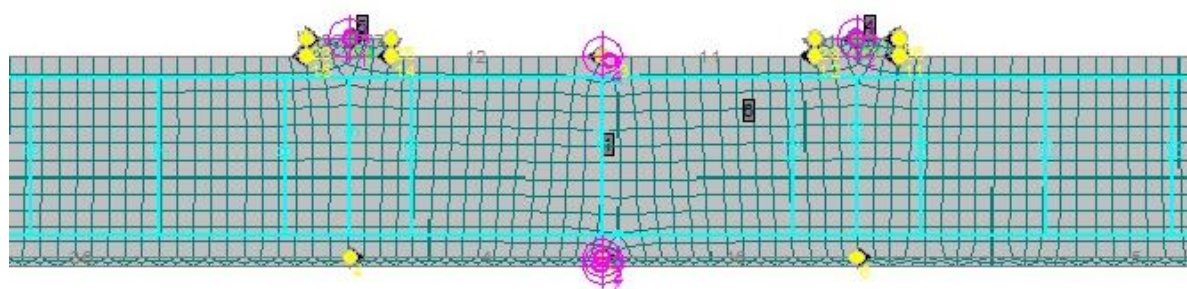
Zesílený prvek:



Obrázek 7-4 Model zesíleného prvku - celkový pohled



Obrázek 7-5 Model zesíleného prvku - detail ZS1 - levá podpora



Obrázek 7-6 Model zesíleného prvku - detail monitorovacích bodů

Legenda: 1 – MB1 – síla

2 – MB2 – síla

3 – MB3 – deformace

4 – MB4 – napětí v betonu

5 – MB5 – napětí v cfk lamele na kraji 1

6 – MB6 – napětí v cfk lamele na kraji 2

7 – MB7 – napětí v cfk lamele uprostřed

1,000E-0,03 – zatěžovací stav 3 – síla

8. VYHODNOCENÍ A POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

8.1. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY

Po provedení zatěžovacích zkoušek obou prvků byla následně vyhodnocena experimentální analýza. Kromě vyhodnocení sil při vzniku trhlin a sil na mezi únosnosti pro oba prvky byly také vyhodnoceny jejich deformace v měřených oblastech.

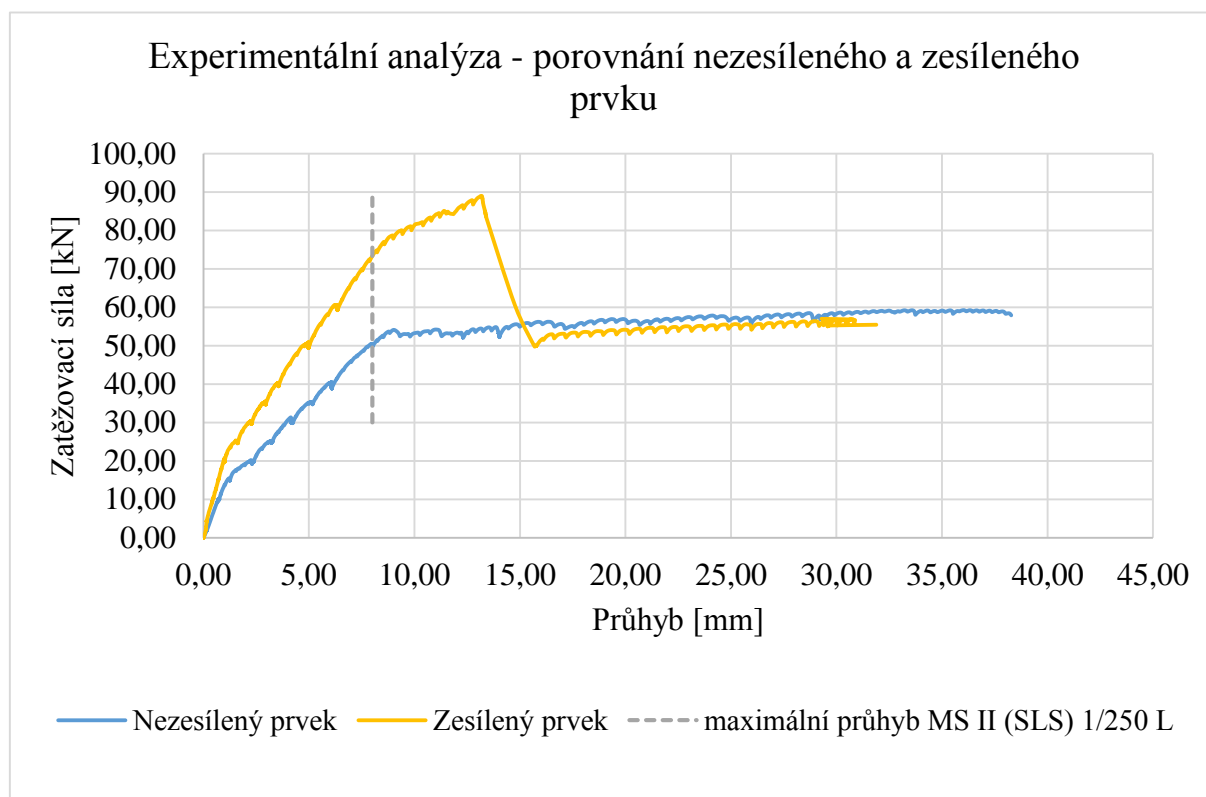
Při experimentální analýze nezesíleného prvku byla naměřena síla na mezi únosnosti 54,09 kN. U prvku zesíleného pomocí externí uhlíkové výztuže byla zjištěna síla na mezi únosnosti 88,97 kN. Delaminace externí výztuže rozhodla o hodnotě maximální síly. Pokud by k ní nedošlo, zatěžování by mohlo dále pokračovat.

Tabulka 8-1 Porovnání výsledků experimentální analýzy pro oba prvky

Experimentální analýza	Nezesílený	Zesílený	Porovnání [%]
Zatížení na mezi vzniku trhlin [kN]	15,07	20,64	136,96
Průhyb na mezi vzniku trhlin [mm]	0,87	1,03	118,39
Zatížení na mezi použitelnosti (L/250) [kN]	53,56	73,38	137,01
Zatížení při průhybu 20 mm [kN]	57,64	54,12	93,89
Zatížení na mezi únosnosti [kN]	54,09	88,98	164,50
Průhyb na mezi únosnosti [mm]	8,18	13,19	161,25

Z výsledků je zřejmé, že zesílení prvku má pozitivní vliv nejen na únosnost, ale také na snížení průhybu uprostřed prvku. U zesíleného prvku je průhyb na mezi použitelnosti dosažen o cca 20 kN později, než u prvku nezesíleného. Únosnost prvku po zesílení se zvyšuje až o 164%. Tyto poznatky lze využít při zesilování konstrukcí, které mají nejen malou únosnost, ale také tendence k nadměrným průhybům. Z výsledků je rovněž patrné, že k delaminaci došlo po dosažení druhého mezního stavu, ale před dosažením průhybu uprostřed prvku 20 mm. Při této hodnotě průhybu je dokonce síla u zesíleného prvku po delaminaci nepatrně menší, než u zesíleného prvku.

Grafické zobrazení výsledků jednotlivých zkoušek je uvedeno v příloze P4.



Graf 8-1 Grafické porovnání výsledků experimentální analýzy pro oba prvky

8.2. VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ NUMERICKÉ ANALÝZY

8.2.1. Vyhodnocení výsledků programu ATENA 2D

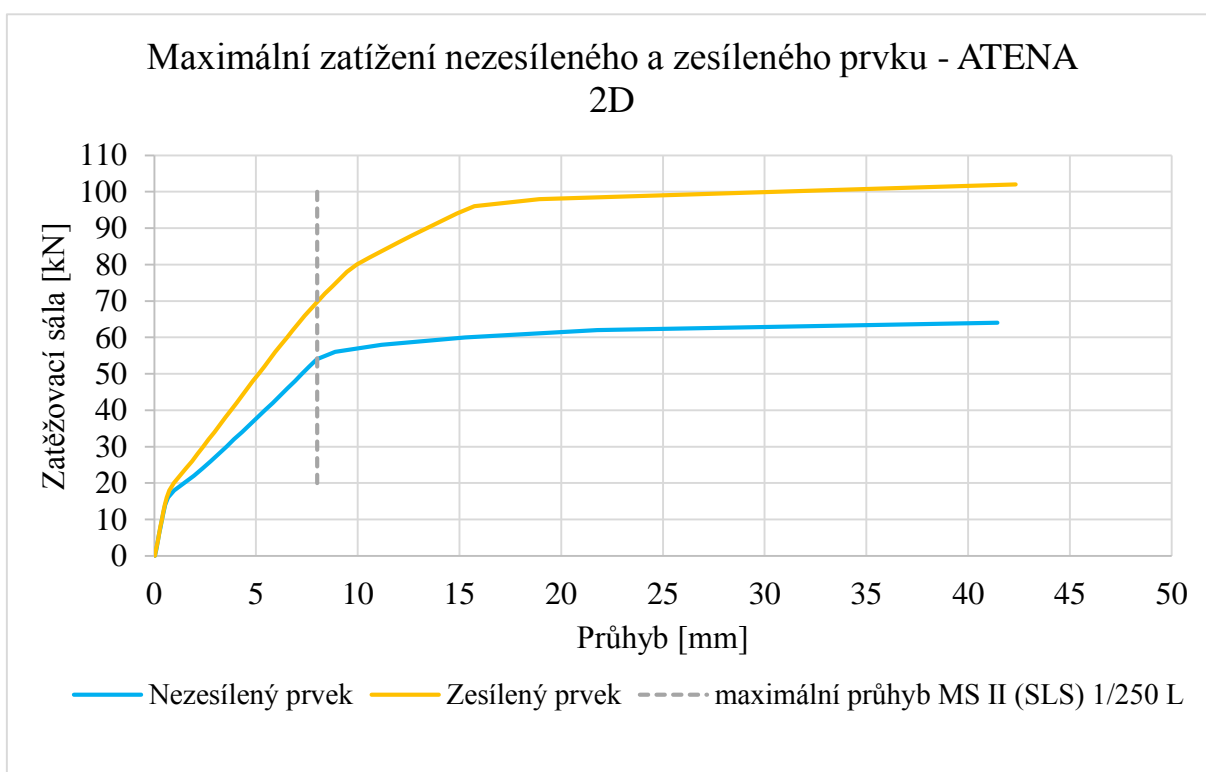
Numerickou analýzou ve výpočetním programu ATENA 2D pro reálné hodnoty vlastností materiálů z doprovodných zkoušek bylo zjištěno, že nezesílený prvek reaguje podobně jako při experimentální analýze. Mez únosnosti byla dosažena při zatěžovací síle 56 kN. Únosnost prvku vyšla tedy vyšší, než při experimentální analýze. K porušení prvku došlo při síle 66 kN.

U prvku zesíleného cfk lamelou reagoval prvek rovněž podobně, jako při experimentální analýze. Mez únosnosti prvku byla dosažena při zatěžovací síle 96 kN. Tuto hodnotu však nelze zcela brát jako dosažení únosnosti prvku. Rozdíl byl především v tom, že při numerické analýze nebyla uvažována delaminace cfk lamely. K porušení prvku došlo při zatěžovací síle 98 kN,

výpočet probíhal až do zatěžovací síly 110 kN. Možnosti výpočtu programu a zadání materiálů neumožňují postihnout odtržení povrchové vrstvy betonu. Při analýze v programu ATENA 2D tedy probíhá zatěžování až do dosažení hodnot napětí přesahujících pevnosti betonu v tlaku v celém prvku, jako u nezesíleného prvku.

Tabulka 8-2 Porovnání výsledků numerické analýzy v ATENA 2D pro oba prvky

Numerická analýza ATENA 2D	Nezesílený	Zesílený	Porovnání [%]
Zatížení na mezi vzniku trhlin [kN]	16,00	18,00	112,50
Průhyb na mezi vzniku trhlin [mm]	0,67	0,73	108,96
Zatížení na mezi použitelnosti (L/250) [kN]	54,00	70,00	129,63
Zatížení při průhybu 20 mm [kN]	61,46	98,19	159,76
Zatížení na mezi únosnosti [kN]	56,00	96,00	171,43
Průhyb na mezi únosnosti [mm]	8,89	15,73	176,94



Graf 8-2 Grafické porovnání výsledků numerické analýzy v programu ATENA 2D pro oba prvky

Z porovnání výsledků je zřejmé, že při zesílení dochází ke zvýšení únosnosti prvku, a také ke snížení průhybů. Zatížení na mezi použitelnosti je zde u zesíleného prvku o 14 kN větší, než u nezesíleného prvku. Únosnost prvku

se zvýšila o 171%. Oproti experimentální analýze je zde tedy především rozdíl z toho důvodu, že při numerické analýze není zohledněna delaminace.

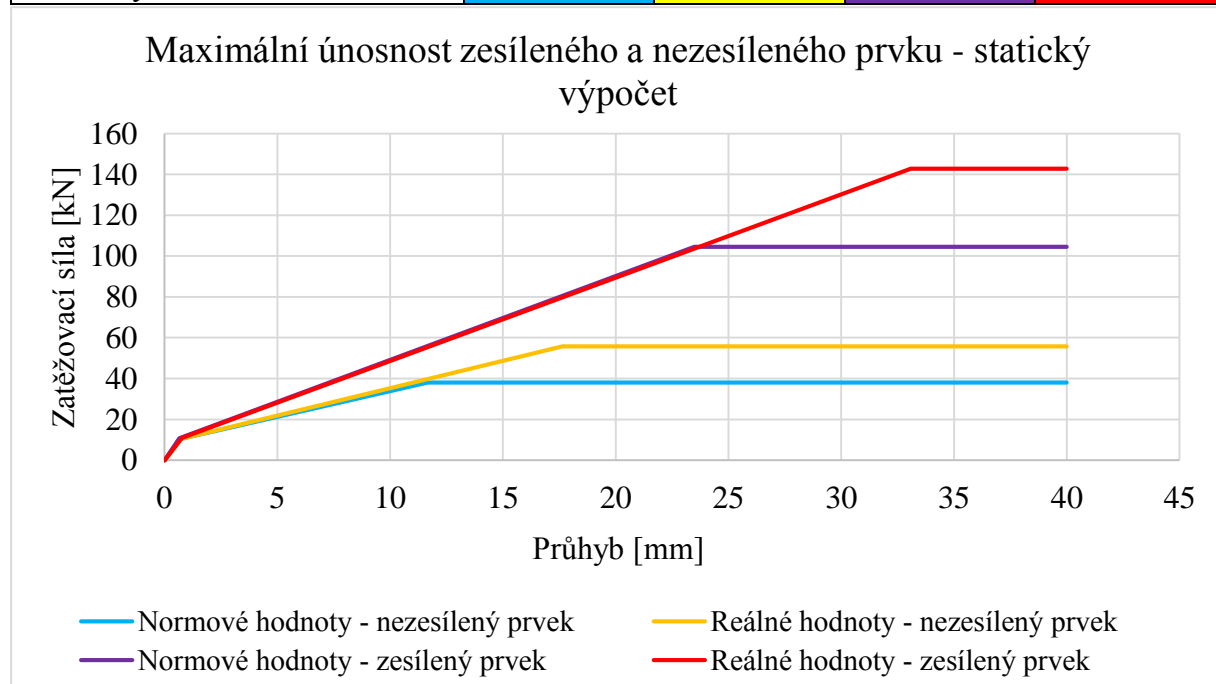
Grafické výstupy numerické analýzy modelu jsou uvedeny v příloze P5.

8.2.2. Vyhodnocení výsledků statického výpočtu

Podle normy ČSN EN 1992-1-1 [1-5] byl proveden statický výpočet zkušebních prvků s ohledem na navrženou třídu betonu a jeho rozměry – viz příloha P3. Ve výpočtu se stanovila únosnost zesíleného a nezesíleného prvku s normovými a reálnými hodnotami z doprovodných zkoušek. Únosnost byla rovněž stanovena pro prvek oslabený trhlinami a pro prvek zcela porušený trhlinami. Rovněž byl také vypočítán průhyb prvků pro dané charakteristiky průřezu a zatížení.

Tabulka 8-3 Porovnání výsledků statického výpočtu pro oba prvky

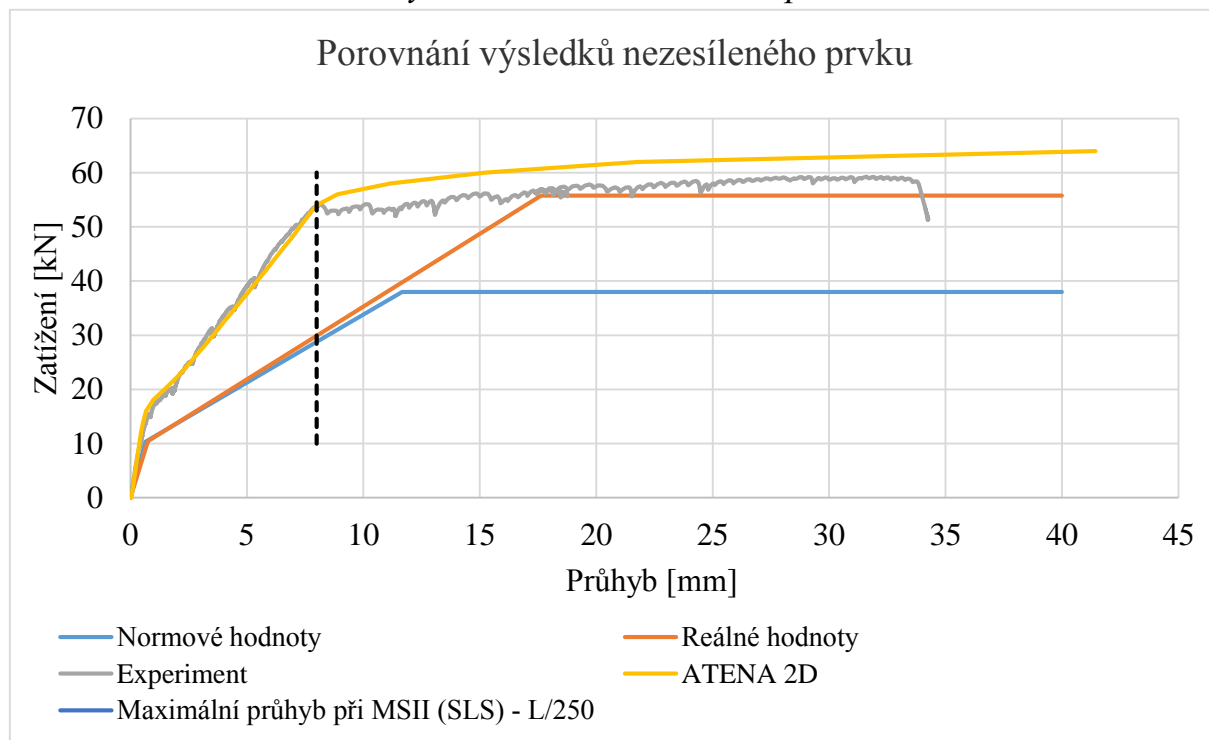
Statický výpočet	Nezesílený prvek		Zesílený prvek	
	Normové hodnoty	Reálné hodnoty	Normové hodnoty	Reálné hodnoty
Zatížení na mezi vzniku trhlin	10,32 kN	10,43 kN	10,72 kN	10,91 kN
Průhyb na mezi vzniku trhlin	0,65 mm	0,76 mm	0,65 mm	0,77 mm
Zatížení na mezi únosnosti	38,01 kN	55,74 kN	104,57 kN	142,77 kN
Průhyb na mezi únosnosti	11,67 mm	17,61 mm	23,49 mm	33,08 mm



Graf 8-3 Grafické porovnání výsledků statického výpočtu pro oba prvky

8.3. POROVNÁNÍ VÝSLEDKŮ

8.3.1. Porovnání výsledků nezesíleného prvku

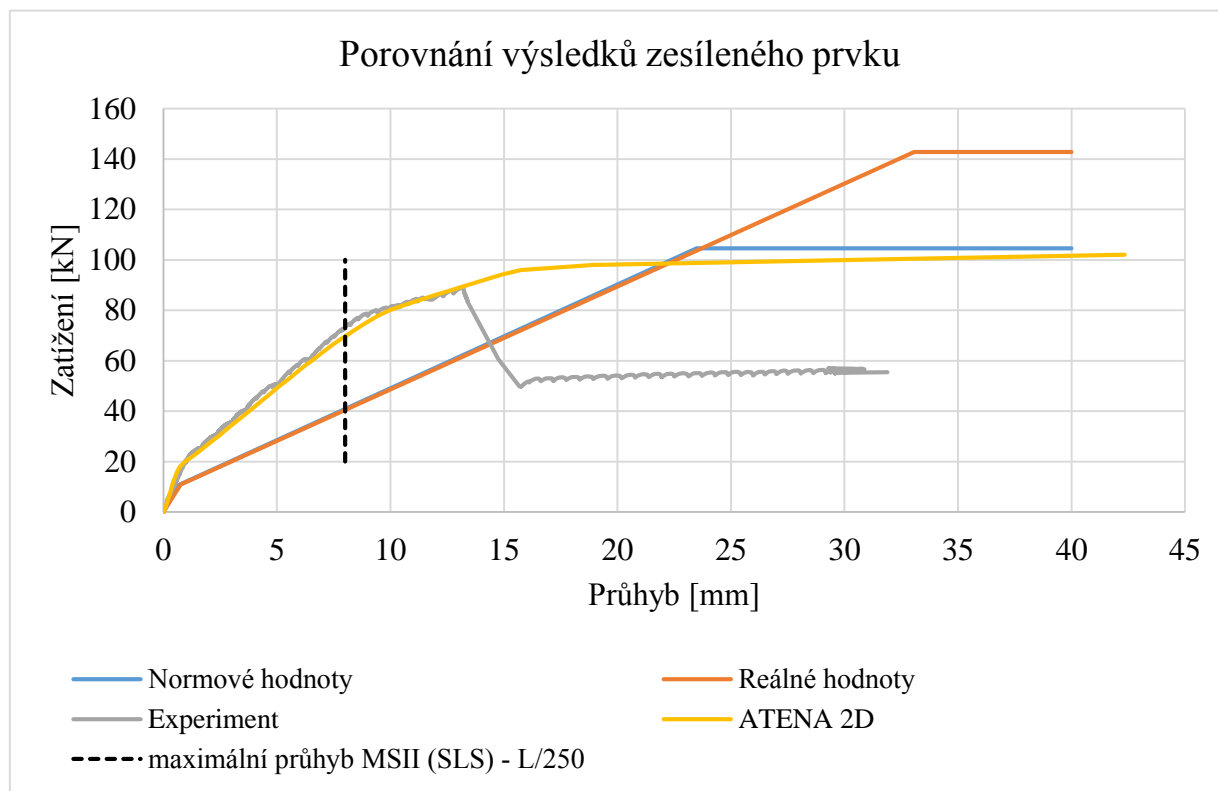


Graf 8-4 Graf porovnání výsledků použitých metod pro nezesílený prvek

Tabulka 8-4 Výsledky nezesíleného prvku pro použité metody

NEZESÍLENÝ PRVEK	Experiment	ATENA 2D	Statický výpočet	
			Normové hodnoty	Reálné hodnoty
Zatížení na mezi vzniku trhlin	15,07 kN	16 kN	10,32 kN	10,43 kN
Průhyb na mezi vzniku trhlin	0,87 mm	0,67 mm	0,65 mm	0,75 mm
Zatížení na mezi použitelnosti (L/250)	53,56 kN	54 kN	23,76 kN	24,53 kN
Zatížení při průhybu 20 mm	57,64 kN	61,46 kN	38,00 kN	55,74 kN
Zatížení na mezi únosnosti	54,09 kN	56 kN	38,00 kN	55,74 kN
Průhyb na mezi únosnosti	8,18 mm	8,89 mm	11,67 mm	17,61 mm
Porovnání únosnosti	100%	103,53%	70,25%	103,05%

8.3.2. Porovnání výsledků zesíleného prvku



Graf 8-5 Graf porovnání výsledků použitých metod pro zesílený prvek

Tabulka 8-5 Výsledky zesíleného prvku pro použité metody

ZESÍLENÝ PRVEK	Experiment	ATENA 2D	Statický výpočet	
			Normové hodnoty	Reálné hodnoty
Zatížení na mezi vzniku trhlin	20,64 kN	18 kN	10,72 kN	10,91 kN
Průhyb na mezi vzniku trhlin	1,03 mm	0,73 mm	0,654 mm	0,77 mm
Zatížení na mezi použitelnosti (L/250)	73,38 kN	70,00 kN	40,91 kN	40,42 kN
Zatížení při průhybu 20 mm	54,12 kN	98,19 kN	90,23 kN	89,39 kN
Zatížení na mezi únosnosti	88,98 kN	96 kN	104,57 kN	142,77 kN
Průhyb na mezi únosnosti	13,19 mm	15,73 mm	23,49 mm	33,08 mm
Porovnání únosnosti	100%	108,89%	117,52%	160,45%

9. ZÁVĚR

V diplomové práci je teoreticky popsáno externí zesilování konstrukcí pomocí kovových a nekovových materiálů a jejich aplikace. Dále je zde teoreticky popsán beton a jeho složení. Stěžejní částí je praktická část, která se zabývá numerickou a experimentální analýzou navrženého železobetonového prvku bez zesílení a následně zesíleného pomocí externí uhlíkové výztuže. Pro numerickou analýzu pomocí programu ATENA 2D proběhly doprovodné zkoušky na tělesech, vybetonovaných při betonáži zkušebních železobetonových prvků, a také tahové zkoušky použité betonářské oceli. Doprovodné zkoušky a experimentální analýza probíhaly v prostorách Ústavu stavebního zkušebnictví.

Zatížení na mezi únosnosti nezesíleného prvku při experimentální analýze vyšlo 54,09 kN. Tento výsledek je podobný výsledkům numerické analýzy v programu ATENA 2D, kde je zatížení na mezi únosnosti 56 kN. Statický výpočet s reálnými hodnotami vychází podobně (55,74 kN), jako experiment a analýza v programu ATENA 2D. Průhyb zde vychází při porušení mnohem větší. Ve statickém výpočtu s normovými hodnotami vlastností prvků je síla o zhruba 1/3 menší (38 kN), než ve výpočtu s reálnými hodnotami, jelikož normové hodnoty jsou menší, než reálné hodnoty vlastností prvků z doprovodných zkoušek. Nesrovnalosti mohou vznikat při průběhu závislosti zatížení na průhybu po mezi vzniku trhlin, kdy se prvek při experimentu a analýze v programu ATENA 2D chová jako tužší, než při statickém výpočtu.

Experimentální analýza zesíleného prvku v laboratoři byla ovlivněna delaminací externí uhlíkové výztuže, při které došlo k porušení povrchové vrstvy betonu a následnému odtržení. Delaminace rozhodla o hodnotě síly na mezi únosnosti 88,98 kN. Příčinou delaminace je omezená smyková únosnost povrchové vrstvy betonu. Proto je třeba, pro budoucí eliminaci tohoto problému, zvětšit plochu lepené výztuže, kotvit externí výztuž pomocí mechanických prostředků a také zlepšit kvalitu povrchové vrstvy betonu.

Hodnota meze únosnosti při numerické analýze v programu ATENA 2D je asi o 9% větší, než mez únosnosti u experimentální analýzy. Rozdíl při analýze zesíleného prvku je především v tom, že při numerické analýze není uvažována delaminace. Doporučení pro další analýzy v programu ATENA 2D je především zpřesnit chování modelových materiálů. To se dá docílit například více zkouškami na doprovodných materiálech, jako jsou zkouška lomových parametrů betonu, zkouška přídržnosti povrchové vrstvy betonu, a tahová zkouška externí uhlíkové výztuže. Tím se zvýší počet zadávaných parametrů a přesnost modelu.

Statický výpočet zesíleného prvku nepočítá s delaminací, proto jsou normové (104,569 kN) a reálné hodnoty (142,769kN) maximálního zatížení mnohem větší, než při experimentu, a to z důvodu plného využití vnější a vnitřní výztuže v plastické oblasti.

10. SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

10.1. SEZNAM NOREM

- [1-1] ČSN EN 206 Beton. Vlastnosti, výroba, ukládání a kritéria hodnocení
- [1-2] ČSN EN 197-1 ed. 2 Cement – Část 1: Složení, specifikace a kritéria shody cementů pro obecné použití
- [1-3] ČSN EN 12390-3 Zkoušení ztvrdlého betonu – Část 3: Pevnost v tlaku zkušebních těles
- [1-4] EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí
- [1-5] EN 1992-1-1 Eurokód 2: Navrhování betonových konstrukcí
- [1-6] ČSN 73 6174 Zkoušení statického modulu pružnosti
- [1-7] ČSN EN 10002-1 – Kovové materiály, Zkoušené tahem - Část 1: Zkušební metoda za okolní teploty
- [1-8] ČSN 73 2030 Zatěžovací zkoušky stavebních konstrukcí
- [1-9] Ostatní související ČSN, EN, ISO

10.2. SEZNAM SKRIPT A OPOR

- [2-1] ADÁMEK, Jiří. *Stavební látky*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2006.
- [2-2] VYMAZAL, Tomáš. *Stavební látky - cvičebnice*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-7204-672-0.
- [2-3] HELA, Rudolf. *Zkušebnictví a technologie*. Brno: Vysoké učení technické, Fakulta stavební, 2005.
- [2-4] Ing. Pavel Schmid, Ph.D. *ZKUŠEBNICTVÍ A TECHNOLOGIE MODUL BI02-M02 STAVEBNÍ ZKUŠEBNICTVÍ*, VUT v Brně – Fakulta stavební

[2-5] HEŘMÁNKOVÁ, Věra. *Zkušebnictví a technologie - cvičebnice*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-758-1.

[2-6] ZICH, Miloš. *Příklady posouzení betonových prvků dle eurokódů*. Praha: Dashöfer, 2010. ISBN 978-80-86897-38-7.

[2-7] PANÁČEK, Josef. *Prvky betonových konstrukcí*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2007. Studijní opory pro studijní programy s kombinovanou formou studia. ISBN 978-80-7204-515-0.

[2-8] Manuál programu pro nelineární výpočty železobetonových konstrukcí - ATENA 2D, ATENA 3D, 1.-4. část, Červenka Consulting

10.3 SEZNAM BAKALÁŘSKÝCH A DIPLOMOVÝCH PRACÍ

[3-1] PTÁČKOVÁ, Kristýna. *Experimentální a numerická analýza zesílení železobetonového vetknutého prvku*. Brno, 2011. 52 s., 58 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Žítt.

[3-2] Bc. Karel Vepřek *Experimentální a numerická analýza zesílení ŽB prvku na ohyb*. Brno, 2015. 54 s., 51 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav stavebního zkušebnictví. Vedoucí práce Ing. Petr Žítt

[3-3] RORHBACHER, I. *Experimentální a numerická analýza žb. prvku zesilovaného externí lepenou výztuží, diplomová práce*. Brno, 2011. 46 s., 63 s. příloh. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta stavební. Vedoucí práce Ing. Petr Žítt.

10.4 SEZNAM INTERNETOVÝCH ZDROJŮ

- [4-1] Časopis stavebnictví: *Zesilování stavebních konstrukcí dodatečně lepenou kompozitní výztuží [online]*. -: -, 2008 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: http://www.casopisstavebnictvi.cz/zesilovani-stavebnich-konstrukci-dodatecne-lepenou-kompozitni-vyztuzi_N1126
- [4-2] *FREYSSINET CS a.s.* [online]. -: -, - [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: http://www.freyssinet.cz/217-zesilovani_konstrukci
- [4-3] *SKUPINA EFISAN: Zesilování konstrukcí uhlíkovými lamelami a tkaninami* [online]. -: -, 2013 [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.efisan.cz/sluzby/conrect-sluzby/sanace-betonovych-konstrukci/zesilovani-konstrukci-uhlikovymi-lamelami-a-tkaninami/>
- [4-4] *Mechanické vlastnosti betonu a oceli Pracovní diagram betonu Třídy betonu podle EN 1992 Smršťování Dotvarování Pracovní diagram oceli Krycí vrstva betonu.* [online]. -: -, - [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://slideplayer.cz/slide/2510831/>
- [4-5] *Stavební látky, Beton 1, Ing. Lubomír Vitek, Ph.D.* [online]. -: -, - [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/AI01/beton1.pdf>
- [4-6] *ZESILOVÁNÍ A STATICKÉ ZAJIŠTĚNÍ KONSTRUKCÍ, KOMPOZITNÍ MATERIÁLY* [online]. -: -, - [cit. 2016-12-31]. Dostupné z: <http://www.szk.fce.vutbr.cz/vyuka/CI57/Zesilov%C3%A1n%C3%AD%20konstruk%C3%AD,%20kompozitn%C3%AD%20materi%C3%A1ly.pdf>
- [4-7] *Sikadur-30 CE.pdf: Technické listy* [online]. Brno: Sika CZ, 2013 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: http://cze.sika.com/cs/produkty_a_reseni/dokumentace/PDS/PDS_G_Sikadur.html
- [4-8] *Externí uhlíkové výztuže [TESAN]* [online]. Praha: TESAN, - [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://www.tesan.cz/externi-lepene-uhlikove-vystuze/>

11. SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P1 – Vyhodnocení doprovodných zkoušek mechanických vlastností

Příloha P2 – Výkresová dokumentace

Příloha P3 – Statický výpočet

Příloha P4 – Vyhodnocení experimentální analýzy

Příloha P5 – Vyhodnocení numerické analýzy

Příloha P6 – Fotodokumentace

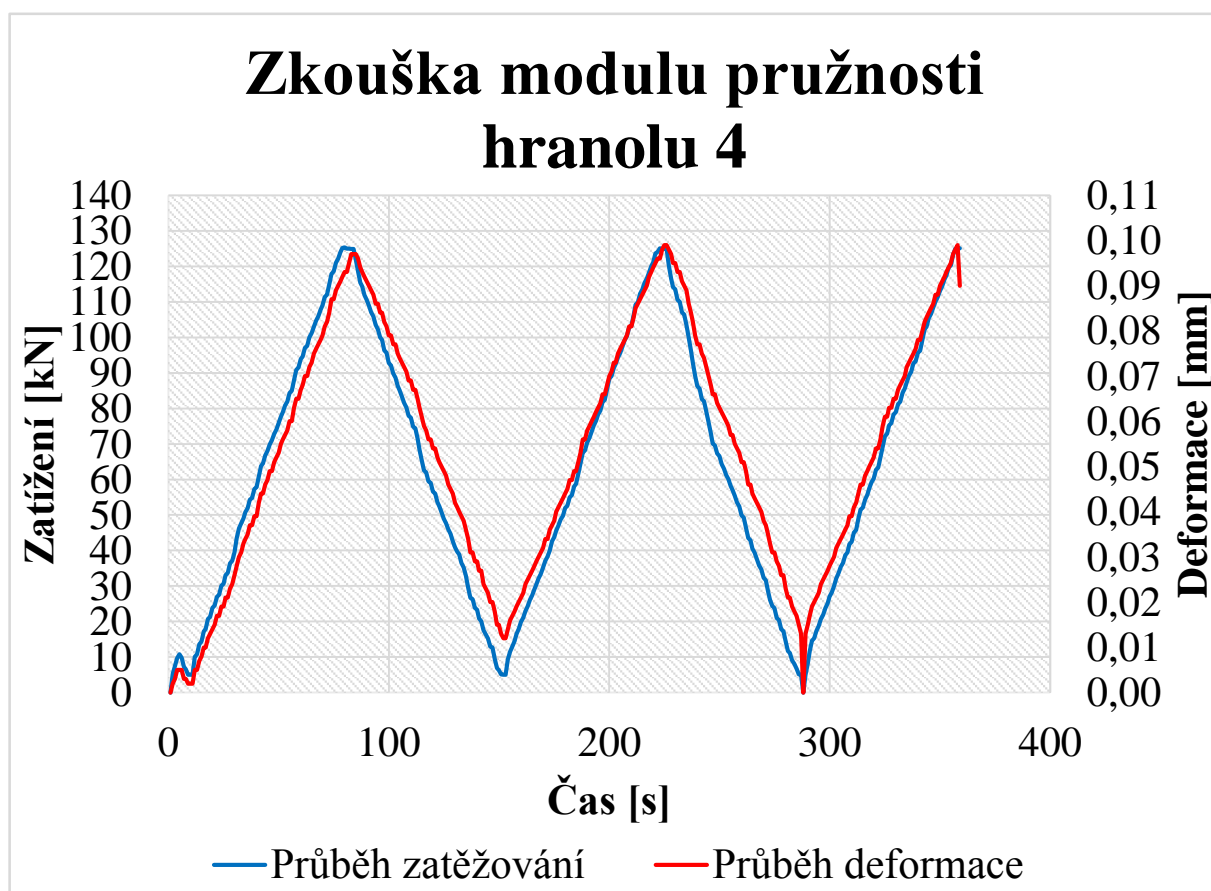
**PŘÍLOHA P1 – VYHODNOCENÍ
DOPROVODNÝCH ZKOUŠEK
MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ**

Výsledky měření a stanovení krychelné pevnosti na krychlech 150*150*150 mm									
Těleso	Rozměry			Objem	Hmotnost	Obj. hm.	Síla	Krychelná pevnost	
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	V [mm ³]	m [kg]	ρ [kg/m ³]	F [kN]	f_c , cube [MPa]	
K1	147,91	149,88	149,88	3322652	7,479	2250	1066,4	48,0	48,5
K2	149,88	150,09	149,88	3371624	7,637	2270	1111,9	49,5	
K3	150,12	151,18	150,13	3407222	7,626	2240	1127,7	49,5	
K4	148,9	150,16	150,13	3356730	7,521	2240	1096,4	49,0	
K5	150,15	150,08	149,88	3377473	7,599	2250	1078,8	48,0	
K6	149,88	150,18	148,88	3351137	7,568	2260	1077,2	48,0	

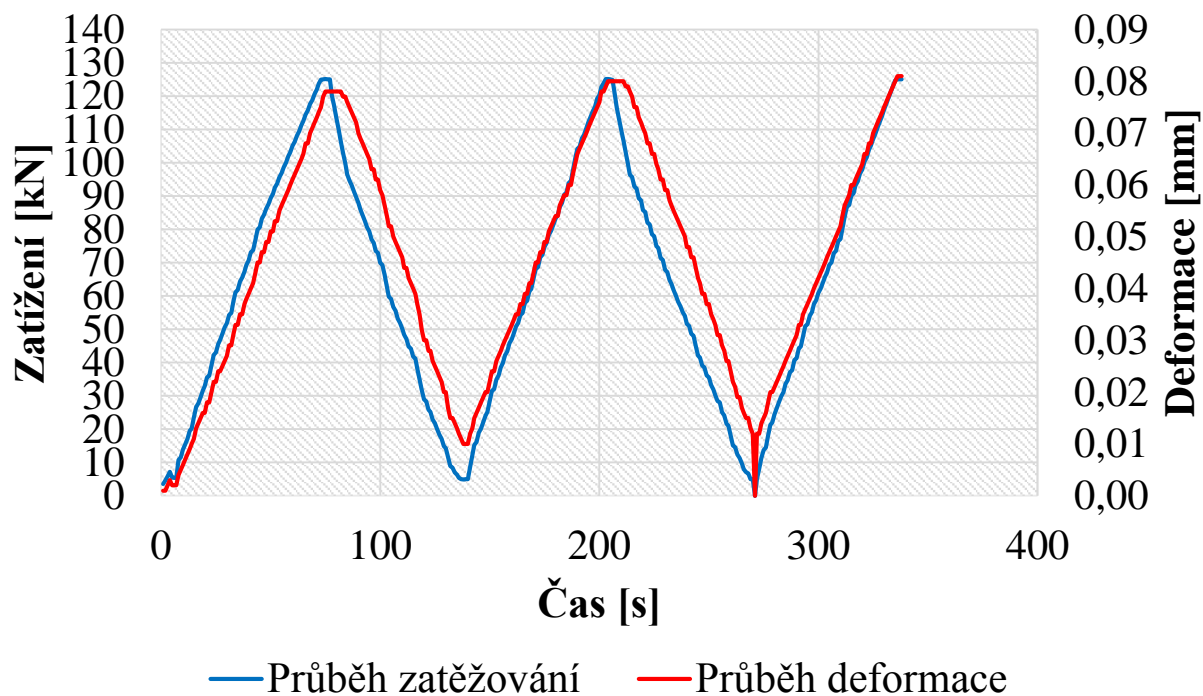
Výsledky měření a stanovení hranolové pevnosti na hranelech 100*100*400 mm									
Těleso	Rozměry			Objem	Hmotnost	Objemová hmotnost	Síla	Hranolová pevnost	
	a [mm]	b [mm]	c [mm]	V [mm ³]	m [kg]	ρ [kg/m ³]	F [kN]	f_c , prism [MPa]	
T1	100,01	100,53	400,41	4025724	9,035	2240	424	42,0	41,5
T2	99,08	99,11	400,07	3928615	8,926	2270	406	41,5	
T3	96,89	100,35	400,3	3892081	8,813	2260	400,7	41,0	

Stanovení statického modulu pružnosti na hranelech 100*100*400 mm										
Vzorek	Plocha průřezu	Základní zatížení	Základní napětí	Horní zatížení	Horní napětí	Rozdíl napětí	Pom. Def. Základní	Pom. Def. Horní	Poměrná deformace	Modul pružnosti
	A [m2]	F1 [kN]	σ_1	F2 [kN]	σ_2	$\Delta\sigma$	ϵ_1 [-]	ϵ_2 [-]	$\Delta\epsilon$ [-]	
Hranol 4	0,0102	5,000	0,493	125,000	12,314	11,821	0,000065	0,000495	0,000430	27500
Hranol 5	0,0099	5,000	0,504	125,000	12,605	12,100	0,000070	0,000525	0,000455	26500
Hranol 6	0,0101	5,000	0,493	125,000	12,328	11,835	0,000071	0,000480	0,000409	29000

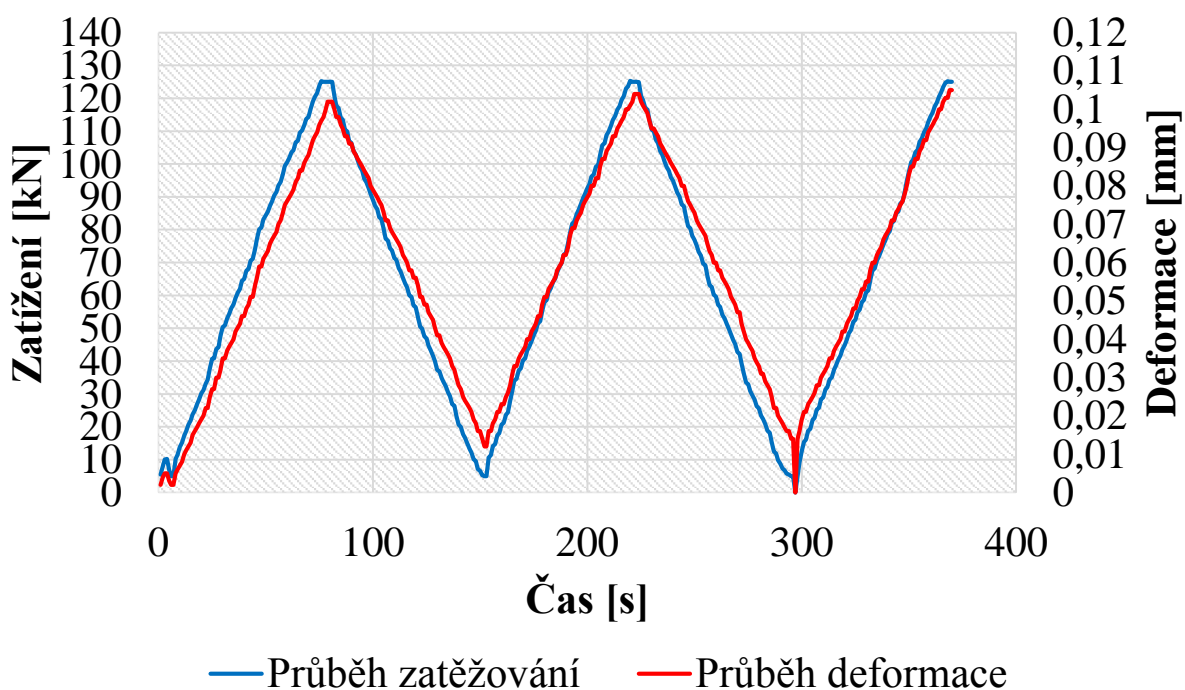
	Zatřídění betonu dle ČSN EN 206			
	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45
f_{ck}	25	30	37	45
$f_{ck}+4$	29	34	41	49
$f_{ck}-4$	21	26	33	41
f_{cm}	48,5	48,5	48,5	48,5
f_{cmin}	48,0	48,0	48,0	48,0
	Kritérium 1:		$f_{cm} \geq f_{ck}+4$	
	Kritérium 2:		$f_{cmin} \geq f_{ck}-4$	



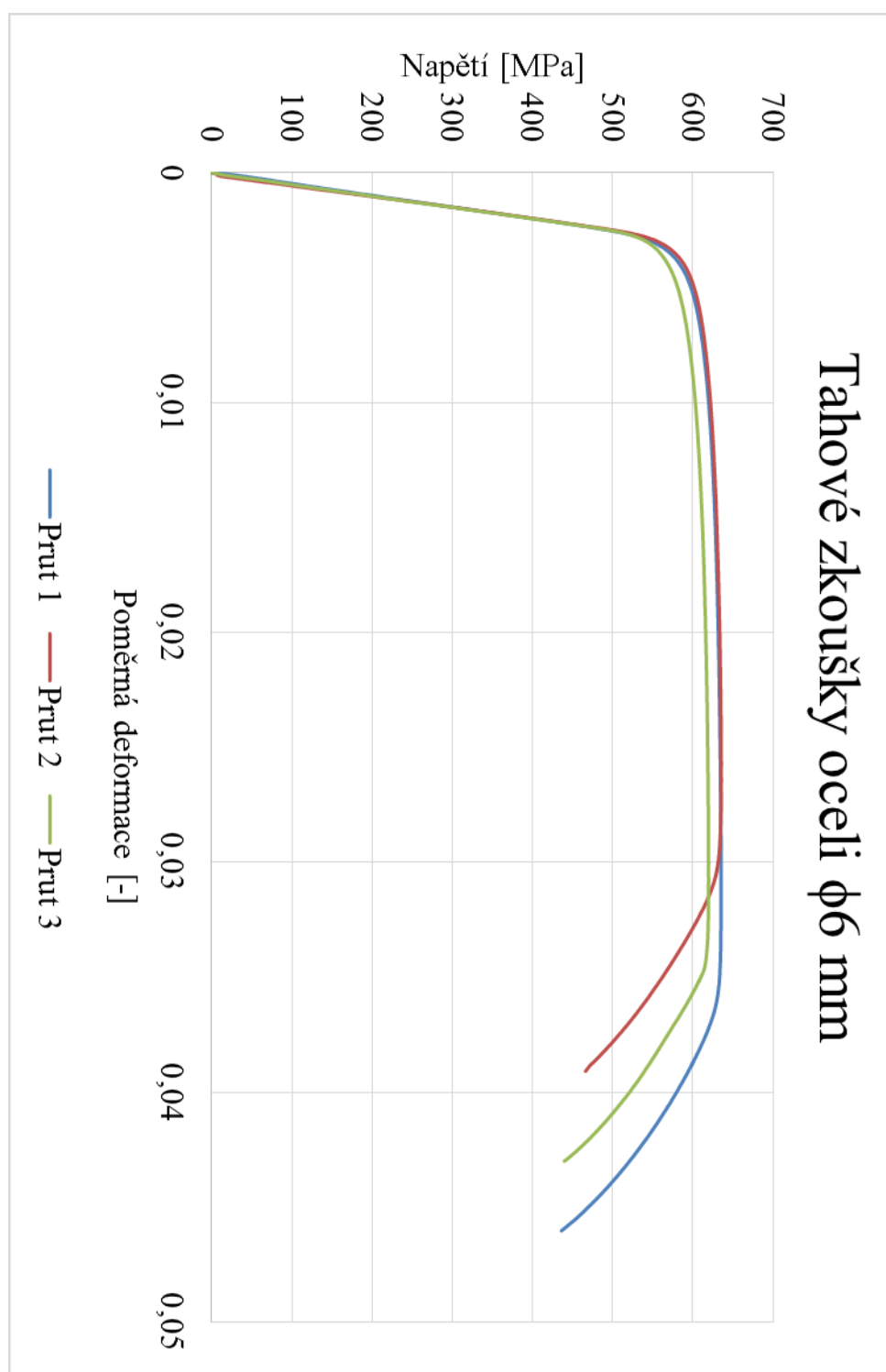
Zkouška modulu pružnosti hranolu 6



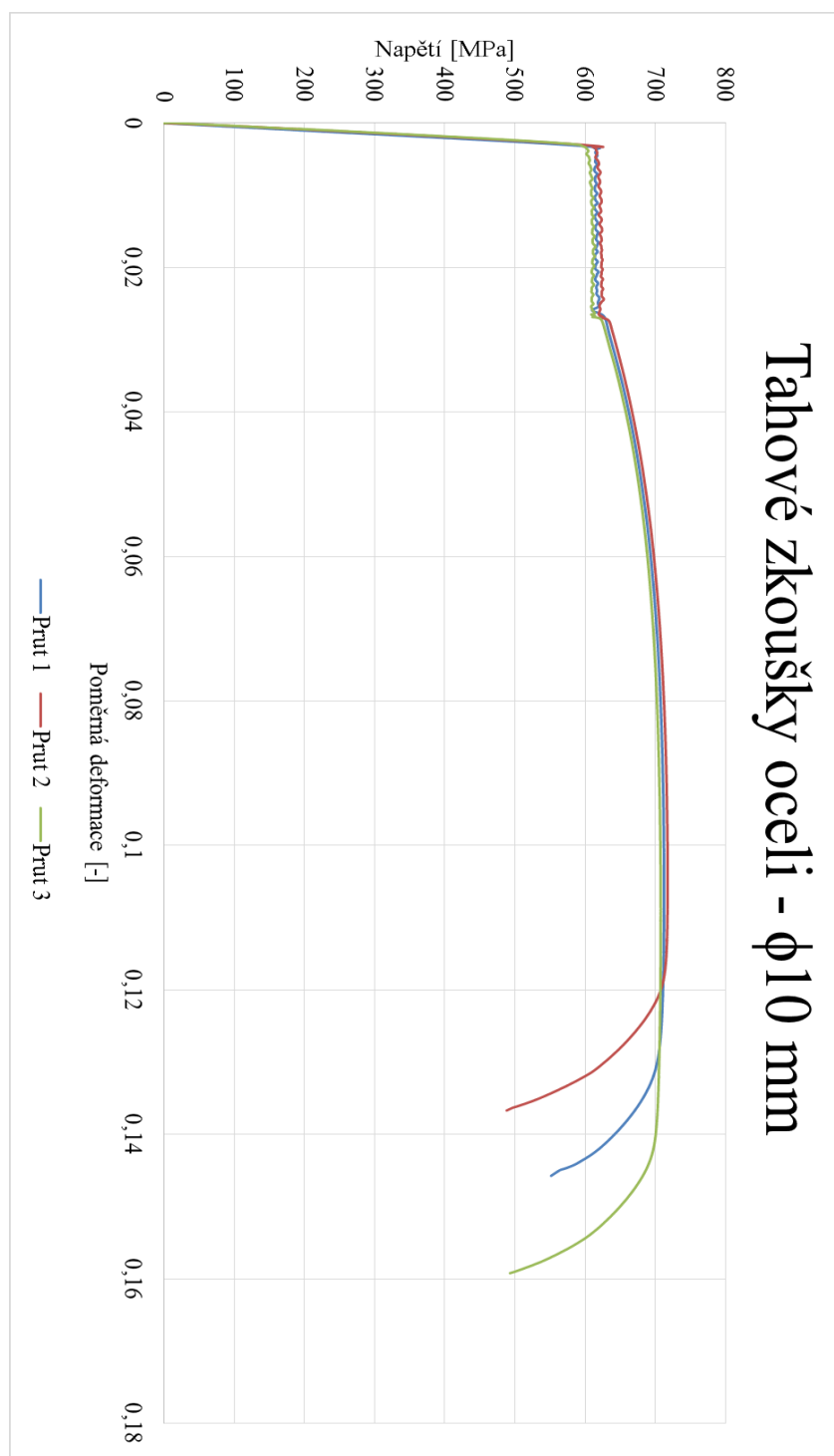
Zkouška modulu pružnosti hranolu 5



Výsledky a vyhodnocení měření tahových zkoušek ocelových prutů $\phi 6$ mm								
Prut	Plocha	Základna	Mez kluzu		Mez pevnosti		Modul pružnosti	
	As [mm ²]		f_y [MPa]		f_u [MPa]		E [MPa]	
1	29,2471	224	600,6	595,3	635,6	630,5	197,5	202,4
2	28,9144	229	603,9		635,8		207,7	
3	28,8747	226	581,3		620,0		201,9	

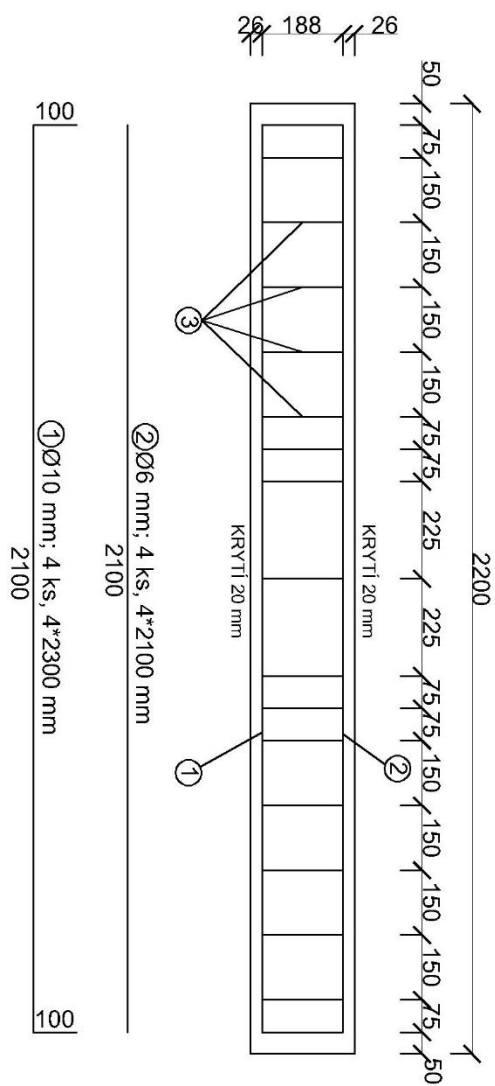


Výsledky a vyhodnocení měření a tahových zkoušek ocelových prutů $\phi 10$ mm								
Prut	Plocha	Základna l_0 [mm]	Mez kluzu		Mez pevnosti		Modul pružnosti	
	A_s [mm ²]		f_y [MPa]		f_u [MPa]		E [GPa]	
1	78,1987	228	620,0	619,0	712,8	712,9	193,2	199,4
2	78,3012	228	626,1		717,9		202,1	
3	78,3012	228	610,9		708,1		202,8	

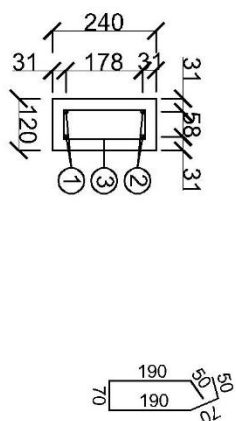


**PŘÍLOHA P2 – VÝKRESOVÁ
DOKUMENTACE**

VÝKRES REÁLNÉHO PROVEDENÍ PRVKU PODÉLNÝ ŘEZ:



PŘÍČNÝ ŘEZ:



③ Tř Ø6 mm; 34 ks, 36*620 mm

BETON C 30/37
OCEL B 500B
TRÍDA VLIVU PROSTŘEDÍ X0
VÝZTUŽ PRO OBA PRVKY

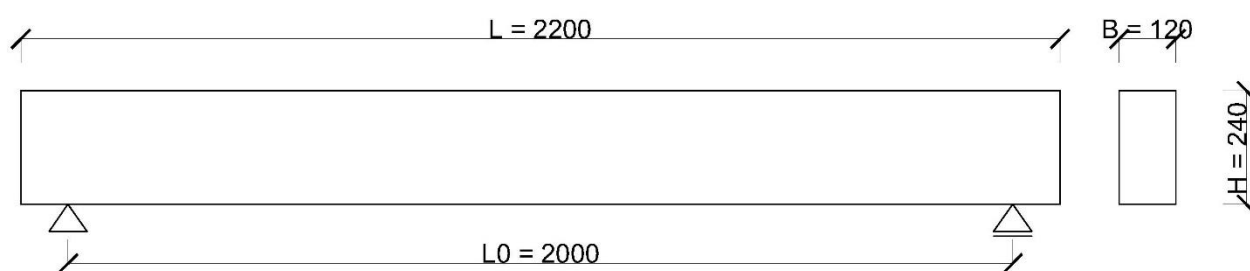
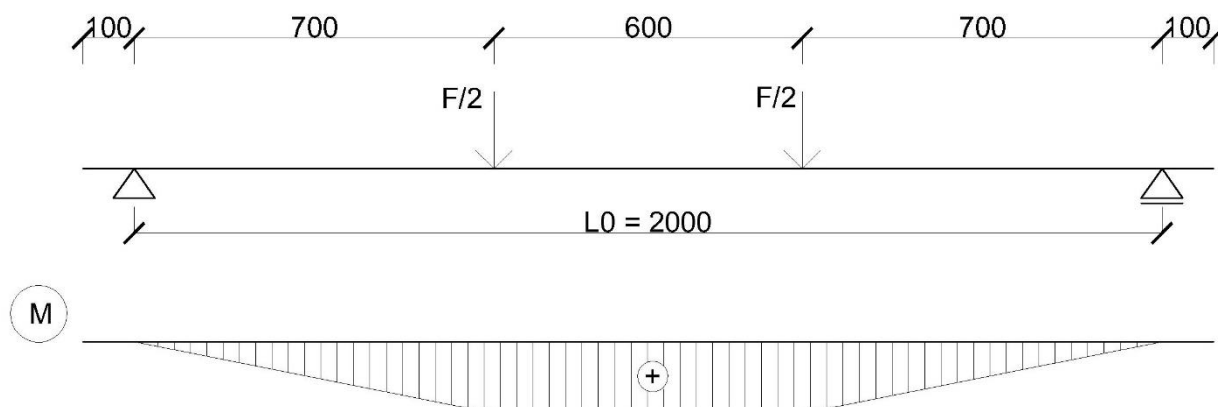
PŘÍLOHA P3 – STATICKÝ VÝPOČET

Předběžný návrh

Beton C 30/37

Ocel B 500B

Uhlíková lamela CFK typ 50

Geometrie prvkuVýška $H = 240$ mmŠířka $B = 120$ mmDélka $L = 2200$ mmVzdálenost podpor $L_0 = 2000$ mm**Statické schéma**Moment v $L/2$

$$M = 2F/0,7 \text{ [kNm]}$$

P 3.1 VÝPOČET NEZESÍLENÉHO PRVKU

Výpočet únosnosti nezesíleného prvku s normovými parametry

Materiálové charakteristiky

BETON C 30/37 $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_f = 30/1,5 = 20 \text{ MPa}$

$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ $E_{cm} = 32 \text{ GPa}$

$f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$

$\gamma_f = 1,5$

OCEL B 500B $f_{yd} = f_y/\gamma_f = 500/1,15 = 434,78 \text{ MPa}$

$f_y = 500 \text{ MPa}$ $E_s = 200 \text{ GPa}$

$\gamma_f = 1,15$

Krytí

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}$$

$$c_{min} = \max \{ c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,y} - \Delta c_{dur,st} - \Delta c_{dur,add}; 10 \text{ mm} \}$$

$$c_{min,b} = \phi_{st} = 10 \text{ mm}$$

$$c_{min,dur} = 10 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dev} = 10 \text{ mm}$$

$$\Delta c_{dur,y} = \Delta c_{dur,st} = \Delta c_{dur,add} = 0 \text{ mm}$$

$$c_{nom} = 10 + 10 = 20 \text{ mm}$$

Návrh krytí: $c = 20 \text{ mm}$

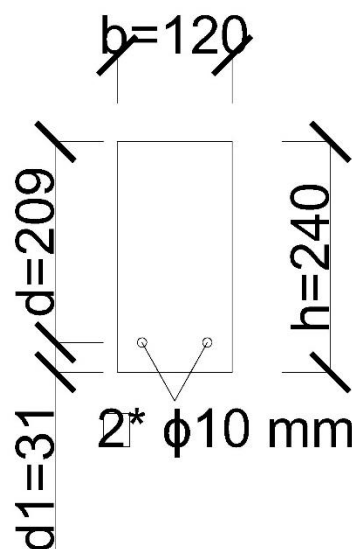
Průřezové charakteristiky

$$c = 20 \text{ mm}$$

$$d_1 = c + \phi_{tir} + \phi_{st}/2 = 20 + 6 + 10/2 = 31 \text{ mm}$$

$$d = h - d_1 = 240 - 31 = 209 \text{ mm}$$

$$A_{st} = \pi * \frac{\phi_{st}^2}{4} * n_{st} = \pi * \frac{10^2}{4} * 2 = 157,08 \text{ mm}^2$$



$$A_{\min} = 0,26 * \frac{f_{ctm}}{f_{yk}} * b * h = 0,26 * \frac{2,9}{500} * 120 * 240 = 43,43 \text{ mm}^2$$

$$A_{\min} \geq 0,0013 * b * d = 0,0013 * 120 * 209 = 32,604 \text{ mm}^2 \dots \text{platí}$$

$$A_{\max} = 0,04 * A_C = 0,04 * 120 * 240 = 1152 \text{ mm}^2$$

$$A_{\max} = 1152 \text{ mm}^2 \geq A_{st} = 157,08 \text{ mm}^2 \geq A_{\min} = 43,43 \text{ mm}^2 \dots \text{platí}$$

Únosnost prvků

Výška tlačené oblasti prvků

$$\chi = \frac{A_{st} * f_{yd}}{b * \lambda * f_{cd}} = \frac{157,08 * 434,78}{120 * 0,8 * 20} = 35,57 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil

$$z = d - 0,5 * \lambda * \chi = 209 - 0,5 * 0,8 * 35,57 = 194,772 \text{ mm}$$

Momentová únosnost nezesíleného prvku dle EC s normovými hodnotami

$$M_{Rd} = A_{st} * f_{yd} * z = 157,08 * 10^{-6} * 434,78 * 10^3 * 194,772 * 10^{-3} = 13,302 \text{ kNm}$$

$$F_{Rd} = \frac{2 * M_{Rd}}{0,7} = \frac{2 * 13,302}{0,7} = 38,005 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu nezesíleného prvku s normovými parametry

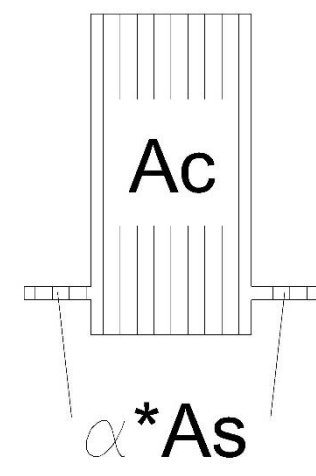
Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu bez zesílení

Beton $A_C = b * h = 240 * 120 = 28800 \text{ mm}^2$

Výztuž $A_{st} = 157,08 \text{ mm}^2$

Poměr modulů pružnosti $\alpha_s = \frac{E_s}{E_c} = \frac{200}{32} = 6,25$

Plocha ideálního průřezu $A_i = A_C + \alpha_s * A_{st} = 28800 + 6,25 * 157,08 = 29781,75 \text{ mm}^2$



$$\text{Statický moment id. průřezu } S_i = A_c * \frac{h}{2} + \alpha_s * A_{st} * d = 28800 * \frac{240}{2} + 6,25 * 157,08 * 209 = 3,66 * 10^6$$

$$\text{Výška tlačené části průřezu } x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{3,66 * 10^6}{29781,75} = 122,93 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$\begin{aligned} I_i &= \frac{1}{12} * b * h^3 + b * h * \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_s * A_{st} * (d - x_i)^2 = \\ &= \frac{1}{12} * 120 * 240^3 + 120 * 240 * \left(\frac{240}{2} - 122,93\right)^2 + 6,25 * 157,08 * (209 - 122,93)^2 = \\ &= 1,458 * 10^8 \text{ mm}^2 = 1,458 * 10^{-4} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Moment na vzniku trhlin

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} * I_i}{h - x_i} = \frac{2,9 * 1,458 * 10^8}{240 - 122,93} = 3,612 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = \frac{2 * M_{CR}}{0,7} = \frac{2 * 3,612}{0,7} = 10,32 \text{ kN}$$

Průhyb plně působícího průřezu (před vznikem trhlin)

$$w_i = \frac{F_{cr} * (3al^2 - 4a^3)}{24EI_i} = \frac{10,32 * (3 * 0,7 * 2^2 - 4 * 0,7^3)}{24 * 32 * 10^6 * 1,458 * 10^{-4}} = 0,647 \text{ mm}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$\begin{aligned} x_{i,r} &= -\frac{\alpha_s * A_{st}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s * A_{st}}{b}\right)^2 + 2 * \frac{\alpha_s * A_{st} * d}{b}} = -\frac{6,25 * 157,08}{120} + \\ &\sqrt{\left(\frac{6,25 * 157,08}{120}\right)^2 + 2 * \frac{6,25 * 157,08 * 209}{120}} = 50,56 \text{ mm} \end{aligned}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu s trhlinami

$$\begin{aligned} I_{i,r} &= \frac{1}{3} * b * x_{i,r}^3 + \alpha_s * A_{st} * (d - x_{i,r})^2 = \frac{1}{3} * 120 * 50,56^3 + 6,25 * 157,08 * (209 - \\ &50,56)^2 = 2,98 * 10^{-5} \text{ m}^4 \end{aligned}$$

Průhyb ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$w_{i,r} = \frac{F_{max} * (3al^2 - 4a^3)}{24EI_{i,r}} = \frac{38,005 * (3 * 0,7 * 2^2 - 4 * 0,7^3)}{24 * 32 * 10^6 * 2,98 * 10^{-5}} = 11,67 \text{ mm}$$

Výpočet únosnosti nezesíleného prvku s reálnými parametry**Materiálové charakteristiky**

BETON $f_{c,cube} = 48,5 \text{ MPa}$

$E_C = 27,5 \text{ GPa}$

OCEL $f_y = 619,016 \text{ MPa}$

$E_S = 199,408 \text{ GPa}$

Výpočet únosnosti prvku

Výška tlačené oblasti

$$\chi = \frac{A_{st} \cdot f_y}{b \cdot \lambda \cdot f_{c,cube}} = \frac{157,08 \cdot 619,016}{120 \cdot 0,8 \cdot 48,5} = 20,884 \text{ mm}$$

Rameno vnitřních sil

$$z = d - 0,5 \cdot \lambda \cdot \chi = 209 - 0,5 \cdot 0,8 \cdot 20,884 = 200,646 \text{ mm}$$

Momentová únosnost nezesíleného prvku dle EC s reálnými hodnotami

$$M_{Rd} = A_{st} \cdot f_{yd} \cdot z = 157,08 \cdot 10^{-6} \cdot 619,016 \cdot 10^3 \cdot 200,646 \cdot 10^{-3} = 19,51 \text{ kNm}$$

$$F_{Rd} = \frac{2 \cdot M_{Rd}}{0,7} = \frac{2 \cdot 19,51}{0,7} = 55,743 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu nezesíleného prvku s reálnými parametry**Charakteristika plně působícího průřezu bez zesílení**

Beton $A_C = b \cdot h = 240 \cdot 120 = 28800 \text{ mm}^2$

Výztuž $A_{st} = 157,08 \text{ mm}^2$

Poměr modulů pružnosti $\alpha_s = \frac{E_S}{E_C} = \frac{199,408}{27,5} = 7,25$

Plocha ideálního průřezu $A_i = A_c + \alpha_s \cdot A_{st} = 28800 + 7,25 \cdot 157,08 = 29939,019 \text{ mm}^2$

Statický moment id. průřezu $S_i = A_c \cdot \frac{h}{2} + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot d = 28800 \cdot \frac{240}{2} + 7,25 \cdot 157,08 \cdot 209 = 3,694 \cdot 10^6$

Výška tlačené části průřezu $x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{3,694 \cdot 10^6}{29939,019} = 123,38 \text{ mm}$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 =$$

$$= \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot \left(\frac{240}{2} - 123,38\right)^2 + 7,25 \cdot 157,08 \cdot (209 - 123,38)^2 =$$

$$= 1,469 \cdot 10^8 \text{ mm}^2 = 1,469 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Moment na vzniku trhlin

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} \cdot I_i}{h - x_i} = \frac{2,9 \cdot 1,469 \cdot 10^8}{240 - 123,38} = 3,65 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = \frac{2 \cdot M_{cr}}{0,7} = \frac{2 \cdot 3,65}{0,7} = 10,428 \text{ kN}$$

Průhyb plně působícího průřezu (před vznikem trhlin)

$$w_i = \frac{F_{cr} \cdot (3al^2 - 4a^3)}{24EI_i} = \frac{10,428 \cdot (3 \cdot 0,7 \cdot 2^2 - 4 \cdot 0,7^3)}{24 \cdot 27,5 \cdot 10^6 \cdot 1,469 \cdot 10^{-4}} = 0,756 \text{ mm}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$x_{i,r} = -\frac{\alpha_s \cdot A_{st}}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s \cdot A_{st}}{b}\right)^2 + 2 \cdot \frac{\alpha_s \cdot A_{st} \cdot d}{b}} = -\frac{7,25 \cdot 157,08}{120} +$$

$$\sqrt{\left(\frac{7,25 \cdot 157,08}{120}\right)^2 + 2 \cdot \frac{7,25 \cdot 157,08 \cdot 209}{120}} = 54,204 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu s trhlinami

$$I_{i,r} = \frac{1}{3} \cdot b \cdot x_{i,r}^3 + \alpha_s \cdot A_{st} \cdot (d - x_{i,r})^2 = \frac{1}{3} \cdot 120 \cdot 54,204^3 + 7,25 \cdot 157,08 \cdot (209 - 54,204)^2 = 3,37 \cdot 10^{-5} \text{ m}^4$$

Průhyb ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$w_{i,r} = \frac{F_{max} \cdot (3al^2 - 4a^3)}{24EI_{i,r}} = \frac{55,743 \cdot (3 \cdot 0,7 \cdot 2^2 - 4 \cdot 0,7^3)}{24 \cdot 27,5 \cdot 10^6 \cdot 3,37 \cdot 10^{-5}} = 17,613 \text{ mm}$$

P 3.2 VÝPOČET ZESÍLENÉHO PRVKU

Výpočet únosnosti zesíleného prvku s normovými parametry

Materiálové charakteristiky

BETON C 30/37 $f_{cd} = f_{ck}/\gamma_f = 30/1,5 = 20 \text{ MPa}$

$f_{ck} = 30 \text{ MPa}$ $E_{cm} = 32 \text{ GPa}$

$f_{ctm} = 2,9 \text{ MPa}$

$\gamma_f = 1,5$

OCEL B 500B $f_{yd} = f_y/\gamma_f = 500/1,15 = 434,78 \text{ MPa}$

$f_y = 500 \text{ MPa}$ $E_s = 200 \text{ GPa}$

$\gamma_f = 1,15$

UHLÍKOVÁ LAMELA CFK typ 50

$f_{yp} = 2400 \text{ MPa}$ $f_{ydp} = f_{yp}/\gamma_f = 2400/1,15 = 2086,96 \text{ MPa}$

$\gamma_f = 1,15$ $E_{sp} = 165 \text{ GPa}$

Průřezové charakteristiky

$c = 20 \text{ mm}$

$d = 209 \text{ mm}$

$d_p = h + 0,5 \cdot h_p = 240 + 0,5 \cdot 1,2 = 240,6 \text{ mm}$

$A_{st} = 157,08 \text{ mm}^2$

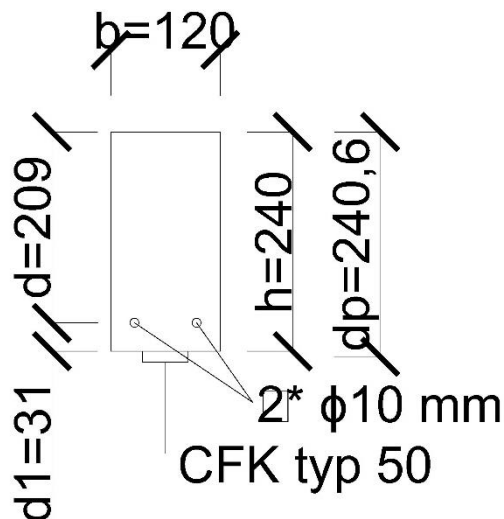
$A_{sp} = 1,2 \cdot 50 = 60 \text{ mm}^2$

Výpočet únosnosti prvku

Výška tlačené oblasti

$N_{Ed} = F_{CC} - F_{st} - F_{sp}$

$0 = A_C \cdot f_{cd} - A_{st} \cdot f_{yd} - A_{sp} \cdot f_{yp}$



$$x = \frac{A_{st} \cdot f_{yd} + A_{sp} \cdot f_{yp}}{b \cdot \lambda \cdot f_{cd}} = \frac{157,08 \cdot 434,78 + 60 \cdot 2086,96}{120 \cdot 0,8 \cdot 20} = 100,788 \text{ mm}$$

Ramena vnitřních sil

$$z_s = d - 0,4 \cdot x = 209 - 0,4 \cdot 100,788 = 168,685 \text{ mm}$$

$$z_p = d_p - 0,4 \cdot x = 240,6 - 0,4 \cdot 100,788 = 200,285 \text{ mm}$$

Momentová únosnost zesíleného prvku dle EC s normovými hodnotami

$$M_{Rd} = A_{st} \cdot f_{yd} \cdot z_s + A_{sp} \cdot f_{ydp} \cdot z_p = 157,08 \cdot 434,78 \cdot 168,685 \cdot 10^{-6} + 60 \cdot 2086,956 \cdot 200,285 \cdot 10^{-6} = 36,599 \text{ kNm}$$

$$F_{Rd} = \frac{2 \cdot M_{Rd}}{0,7} = \frac{2 \cdot 36,599}{0,7} = 104,569 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu zesíleného prvku s normovými parametry

Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu se zesílením

Plocha zesílení $A_P = 60 \text{ mm}^2$

Poměr modulů pružnosti $\alpha_P = \frac{E_P}{E_C} = \frac{165}{32} = 5,156$

Plocha ideálního průřezu $A_i = A_C + \alpha_S \cdot A_{st} + \alpha_P \cdot A_P =$
 $28800 + 6,25 \cdot 157,08 + 5,156 \cdot 60 = 30091,11 \text{ mm}^2$

Statický moment id. průřezu $S_i = A_C \cdot \frac{h}{2} + \alpha_S \cdot A_{st} \cdot d +$
 $\alpha_P \cdot A_P \cdot d_P = 28800 \cdot 120 +$
 $6,25 \cdot 157,08 \cdot 209 +$
 $5,156 \cdot 60 \cdot 240,6 = 3,735 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$

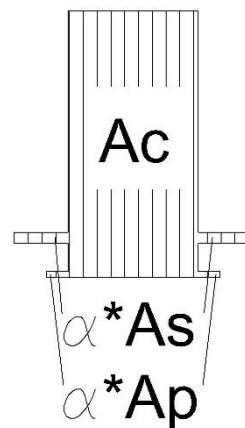
Výška tlačené části průřezu $x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{3,735 \cdot 10^6}{30091,11} = 124,156 \text{ mm}$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3 + b \cdot h \cdot \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_S \cdot A_{st} \cdot (d - x_i)^2 + \alpha_P \cdot A_P \cdot (d_P - x_i)^2 =$$

$$= \frac{1}{12} \cdot 120 \cdot 240^3 + 120 \cdot 240 \cdot \left(\frac{240}{2} - 124,156\right)^2 + 6,25 \cdot 157,08 \cdot (209 - 124,156)^2 +$$

$$5,156 \cdot 60 \cdot (240,6 - 124,156)^2 = 1,499 \cdot 10^8 \text{ mm}^2 = 1,499 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$



Moment na vzniku trhlin

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} * I_i}{h - x_i} = \frac{2,9 * 1,499 * 10^8}{240 - 124,156} = 3,75 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = \frac{2 * M_{CR}}{0,7} = \frac{2 * 3,75}{0,7} = 10,72 \text{ kN}$$

Průhyb plně působícího průřezu (před vznikem trhlin)

$$w_i = \frac{F_{cr} * (3al^2 - 4a^3)}{24EI_i} = \frac{10,72 * (3 * 0,7 * 2^2 - 4 * 0,7^3)}{24 * 32 * 10^6 * 1,499 * 10^{-4}} = 0,654 \text{ mm}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

Výška tlačené oblasti průřezu

$$x_{i,r} = \frac{-\alpha_S * A_{st} + \alpha_P * A_P}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_S * A_{st} + \alpha_P * A_P}{b}\right)^2 + 2 * \frac{\alpha_S * A_{st} * d + \alpha_P * A_P * d_p}{b}} = \frac{-6,25 * 157,08 + 5,156 * 60}{120} +$$

$$\sqrt{\left(\frac{6,25 * 157,08 + 5,156 * 60}{120}\right)^2 + 2 * \frac{6,25 * 157,08 * 209 + 5,156 * 60 * 240,6}{120}} = 63,506 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu s trhlinami

$$I_{i,r} = \frac{1}{3} * b * x_{i,r}^3 + \alpha_S * A_{st} * (d - x_{i,r})^2 + \alpha_P * A_P * (d_p - x_{i,r})^2 = \frac{1}{3} * 120 * 63,506^3 +$$

$$6,25 * 157,08 * (209 - 63,506)^2 + 5,156 * 60 * (240,6 - 63,506)^2 = 4,072 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

Průhyb ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$w_{i,r} = \frac{F_{max} * (3al^2 - 4a^3)}{24EI_{i,r}} = \frac{104,569 * (3 * 0,7 * 2^2 - 4 * 0,7^3)}{24 * 32 * 10^6 * 4,072 * 10^{-5}} = 23,49 \text{ mm}$$

Výpočet únosnosti zesíleného prvku s reálnými parametry**Materiálové charakteristiky**

BETON $f_{c,cube} = 48,5 \text{ MPa}$

$E_C = 27,5 \text{ GPa}$

OCEL $f_y = 619,016 \text{ MPa}$

$E_S = 199,408 \text{ GPa}$

UHLÍKOVÁ LAMELA CFK typ 50

$f_{yp} = 2400 \text{ MPa}$

$$E_P = 165 \text{ GPa}$$

Výpočet únosnosti prvků

Výška tlačené oblasti betonu

$$N_{Ed} = F_{CC} - F_{st} - F_{sp}$$

$$0 = A_C \cdot f_{cd} - A_{st} \cdot f_{yd} - A_{sp} \cdot f_{yp}$$

$$\chi = \frac{A_{st} \cdot f_{yd} + A_{sp} \cdot f_{yp}}{b \cdot \lambda \cdot f_{cd}} = \frac{157,08 \cdot 619,016 + 60 \cdot 2400}{120 \cdot 0,8 \cdot 48,5} = 51,812 \text{ mm}$$

Ramena vnitřních sil

$$z_s = d - 0,4x = 209 - 0,4 \cdot 51,812 = 188,275 \text{ mm}$$

$$z_p = d_p - 0,4x = 240,6 - 0,4 \cdot 51,812 = 219,875 \text{ mm}$$

Momentová únosnost zesíleného prvku dle EC s reálnými hodnotami

$$M_{Rd} = A_{st} \cdot f_y \cdot z_s + A_p \cdot f_{yp} \cdot z_p = 157,08 \cdot 619,016 \cdot 188,275 \cdot 10^{-6} + 60 \cdot 2400 \cdot 216,784 \cdot 10^{-6} = 49,969 \text{ kNm}$$

$$F_{Rd} = \frac{2 \cdot M_{Rd}}{0,7} = \frac{2 \cdot 49,969}{0,7} = 142,769 \text{ kN}$$

Výpočet průhybu zesíleného prvku s reálnými parametry

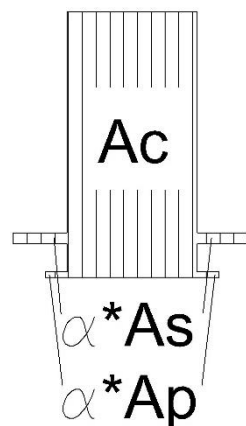
Charakteristiky plně působícího ideálního průřezu se zesílením

Plocha zesílení $A_p = 60 \text{ mm}^2$

Poměr modulů pružnosti $\alpha_P = \frac{E_P}{E_C} = \frac{165}{27,5} = 6$

Plocha ideálního průřezu $A_i = A_C + \alpha_S \cdot A_{st} + \alpha_P \cdot A_p = 28800 + 7,25 \cdot 157,08 + 6 \cdot 60 = 30299,019 \text{ mm}^2$

Statický moment id. průřezu $S_i = A_C \cdot \frac{h}{2} + \alpha_S \cdot A_{st} \cdot d + \alpha_P \cdot A_p \cdot d_p = 28800 \cdot 120 + 7,25 \cdot 157,08 \cdot 209 + 6 \cdot 60 \cdot 240,6 = 3,78 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$



Výška tlačené části průřezu $x_i = \frac{S_i}{A_i} = \frac{3,78 \cdot 10^6}{30299,019} = 124,757 \text{ mm}$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu

$$I_i = \frac{1}{12} * b * h^3 + b * h * \left(\frac{h}{2} - x_i\right)^2 + \alpha_s * A_{st} * (d - x_i)^2 =$$

$$= \frac{1}{12} * 120 * 240^3 + 120 * 240 * \left(\frac{240}{2} - 124,757\right)^2 + 7,25 * 157,08 * (209 - 124,757)^2 +$$

$$6 * 60 * (240,6 - 124,757)^2 = 1,518 * 10^8 \text{ mm}^2 = 1,518 * 10^{-4} \text{ m}^2$$

Moment na vzniku trhlin

$$M_{cr} = \frac{f_{ctm} * I_i}{h - x_i} = \frac{2,9 * 1,518 * 10^8}{240 - 124,757} = 3,82 \text{ kNm}$$

$$F_{cr} = \frac{2 * M_{CR}}{0,7} = \frac{2 * 3,82}{0,7} = 10,91 \text{ kN}$$

Průhyb plně působícího průřezu (před vznikem trhlin)

$$w_i = \frac{F_{cr} * (3al^2 - 4a^3)}{24EI_i} = \frac{10,91 * (3 * 0,7 * 2^2 - 4 * 0,7^3)}{24 * 27,5 * 10^6 * 1,518 * 10^{-4}} = 0,765 \text{ mm}$$

Charakteristiky ideálního průřezu oslabeného trhlinami

Výška tlačené oblasti průřezu

$$x_{i,r} = \frac{-\alpha_s * A_{st} + \alpha_p * A_p}{b} + \sqrt{\left(\frac{\alpha_s * A_{st} + \alpha_p * A_p}{b}\right)^2 + 2 * \frac{\alpha_s * A_{st} * d + \alpha_p * A_p * d_p}{b}} = \frac{-7,25 * 157,08 + 6 * 60}{120} +$$

$$\sqrt{\left(\frac{7,25 * 157,08 + 6 * 60}{120}\right)^2 + 2 * \frac{7,25 * 157,08 * 209 + 6 * 60 * 240,6}{120}} = 68,122 \text{ mm}$$

Moment setrvačnosti ideálního průřezu s trhlinami

$$I_{i,r} = \frac{1}{3} * b * x_{i,r}^3 + \alpha_s * A_{st} * (d - x_{i,r})^2 + \alpha_p * A_p * (d_p - x_{i,r})^2 = \frac{1}{3} * 120 * 68,122^3 +$$

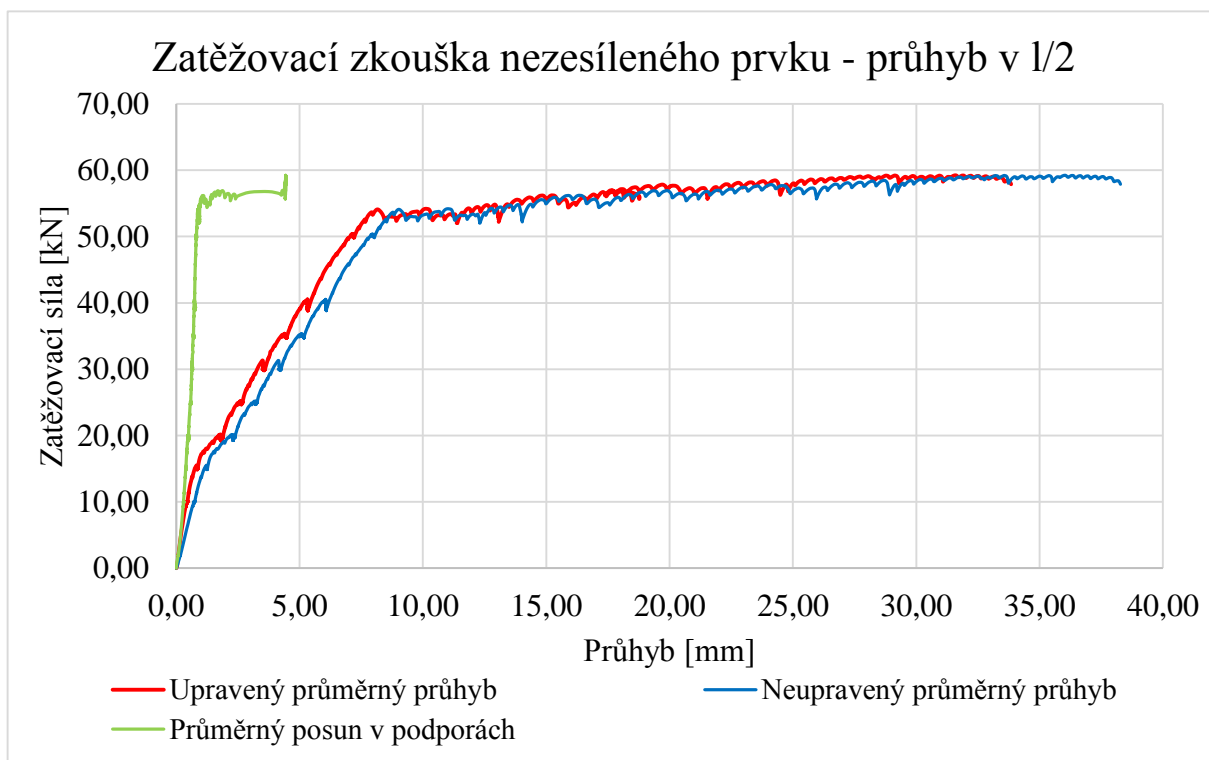
$$7,25 * 157,08 * (209 - 68,122)^2 + 6 * 60 * (240,6 - 68,122)^2 = 4,596 * 10^{-5} \text{ m}^4$$

Průhyb ideálního průřezu oslabeného trhlinami

$$w_{i,r} = \frac{F_{max} * (3al^2 - 4a^3)}{24EI_{i,r}} = \frac{142,769 * (3 * 0,7 * 2^2 - 4 * 0,7^3)}{24 * 27,5 * 10^6 * 4,596 * 10^{-5}} = 33,078 \text{ mm}$$

**PŘÍLOHA P4 – VYHODNOCENÍ
EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZY**

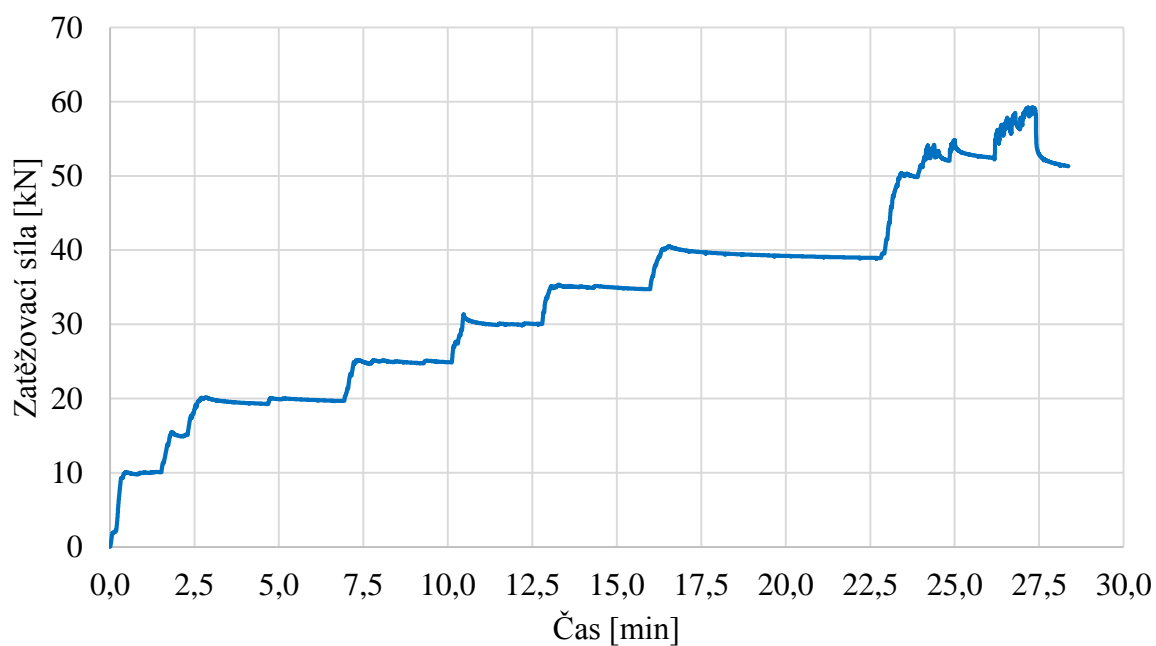
P 4.1 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA NEZESÍLENÉHO PRVKU



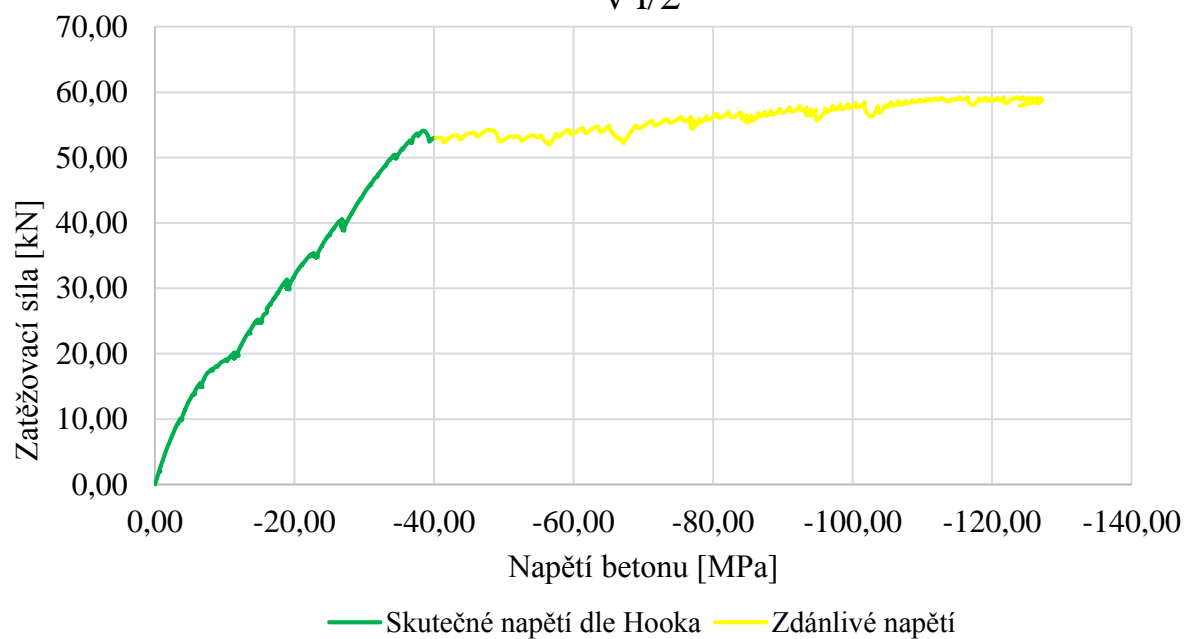
Zatížení a průhyb nosníku:

- 1.) Od začátku zatěžování až po vznik prvních trhlin je graf lineární a plynulý, nejsou zde vidět stopy po přestávkách mezi zatěžováním
- 2.) Následně graf roste až po mez maximálního zatížení, jsou zde vidět známky postupného zatěžování – schodkovité rozdělení křivky. Během zatěžování nevykazoval prvek jiné poruchy, než trhliny. Snižuje se tak účinná výška a tuhost průřezu.
- 3.) Po dosažení maximálního zatížení prvku byl prvek dále zatěžován až do kolapsu, zatěžovací síla se pohybovala na hranici maximálního zatížení. Napětí ve výztuži dosahuje meze kluzu.

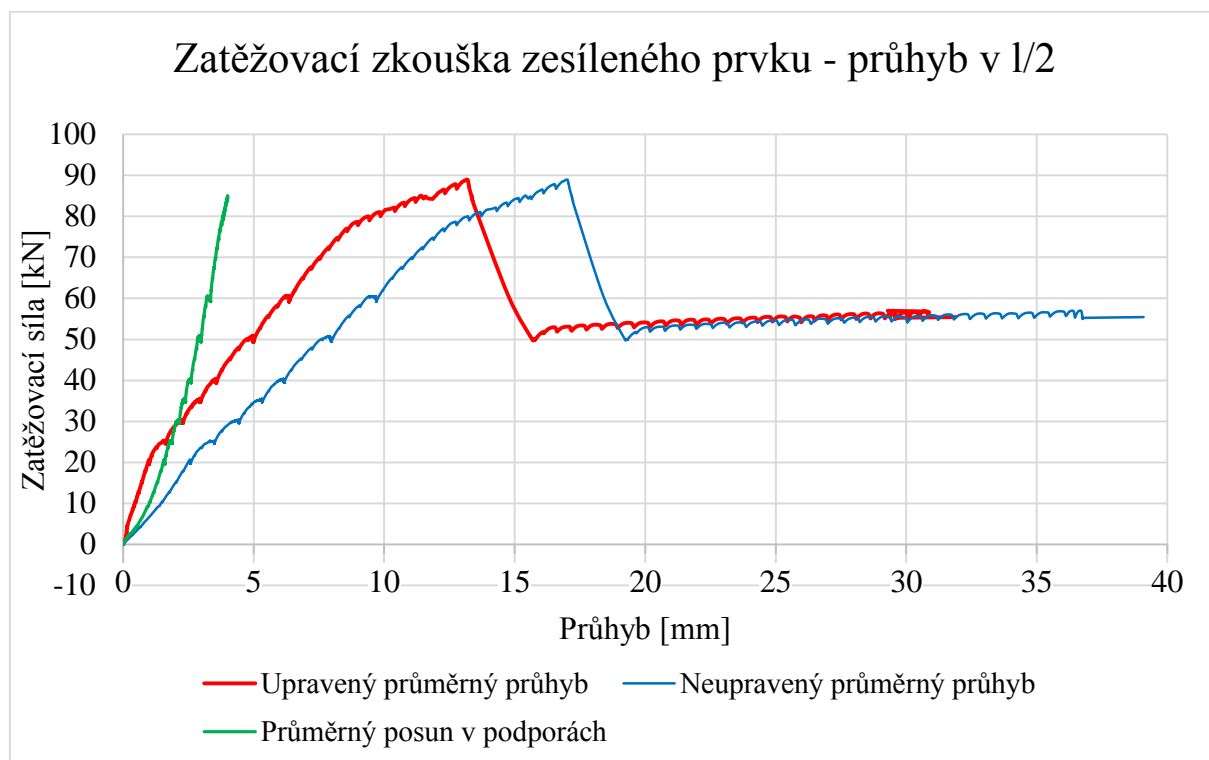
Časový průběh zatěžovací zkoušky nezesíleného prvku



Napětí betonu v horních tlačných vláknech uprostřed - v 1/2



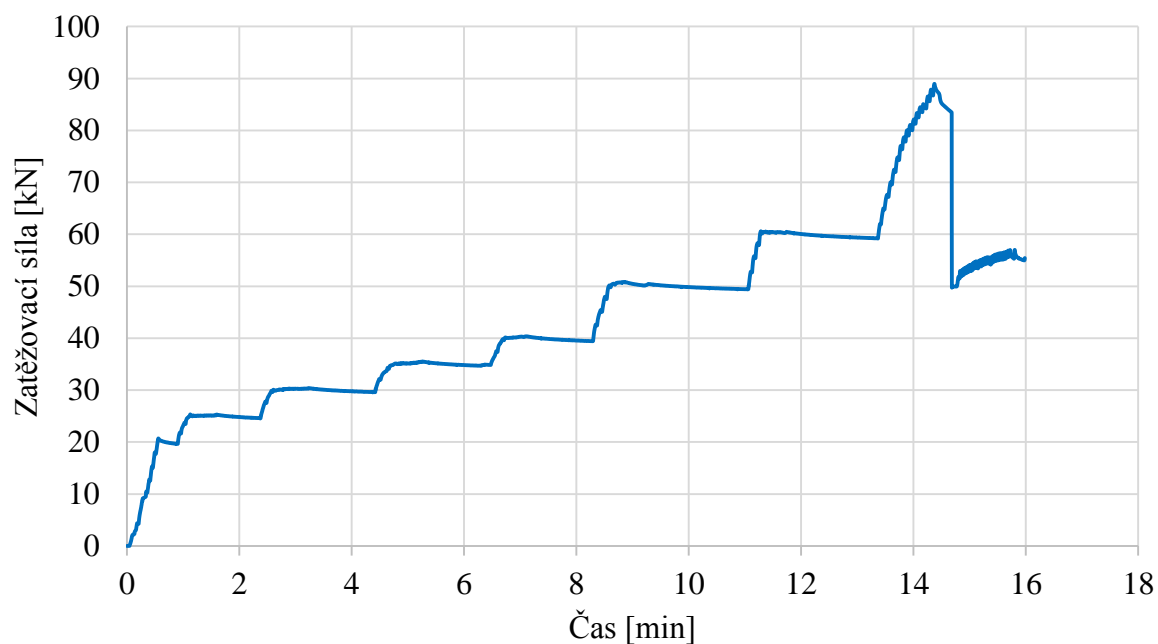
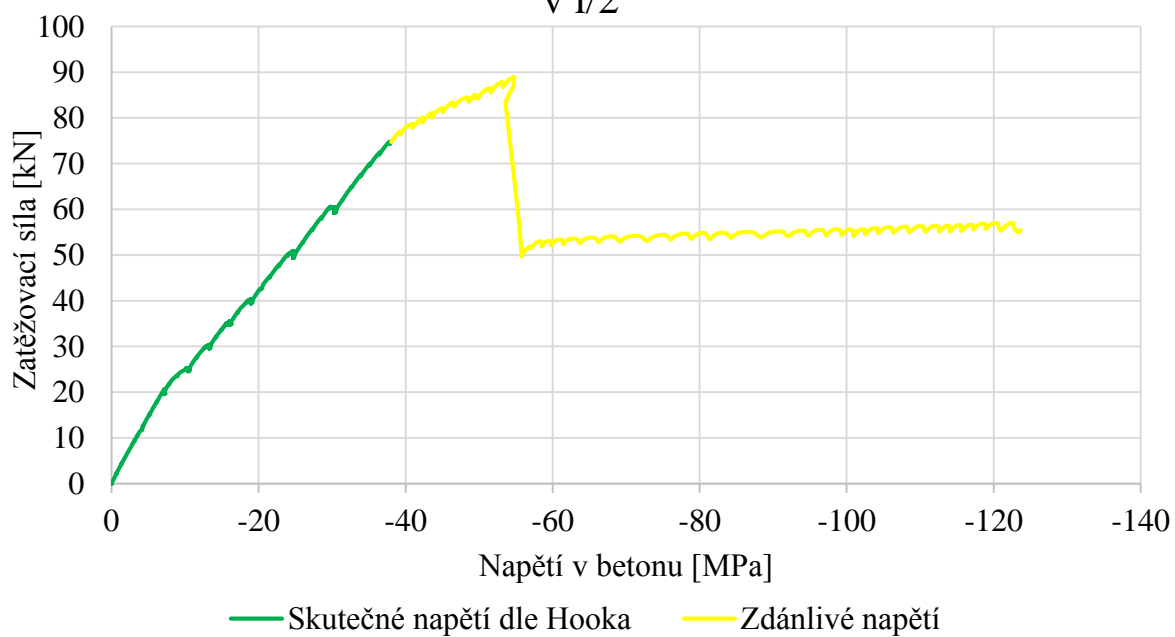
P 4.2 ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKA ZESÍLENÉHO PRVKU



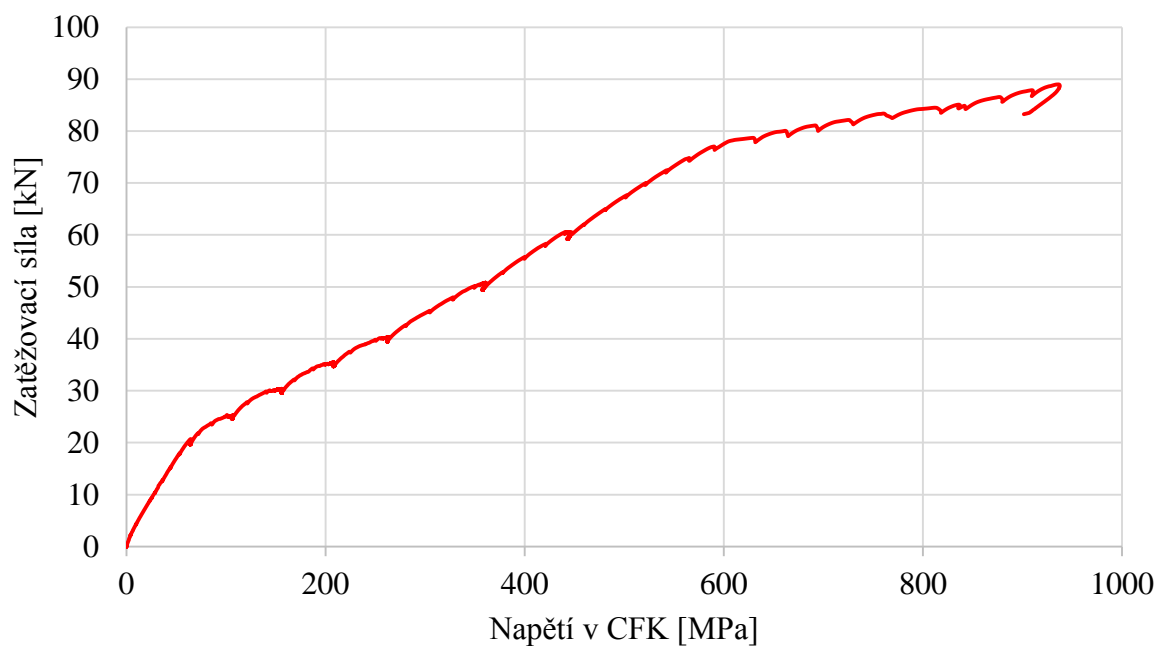
Zatížení a průhyb nosníku:

- 1.) Od začátku zatěžování po první vznik trhlin je graf lineární, nejsou zde vidět stopy po přestávkách mezi zatěžováním, stejně jako u nezesíleného prvku
- 2.) Od vzniku prvních trhlin graf roste až po mez maximálního zatížení, které je způsobeno odtržením povrchové vrstvy betonu s externí výztuží - delaminací. Jsou zde vidět známky postupného zatěžování – schodkovité rozdělení křivky.
- 3.) Následně dochází k poklesu zatěžovací síly, veškeré zatížení přebírá vnitřní výztuž, zatěžování probíhá obdobně, jako u nezesíleného prvku
- 4.) Dále byl prvek zatěžován až do kolapsu, zatěžovací síla se pohybovala lehce pod hranicí maximálního zatížení nezesíleného prvku

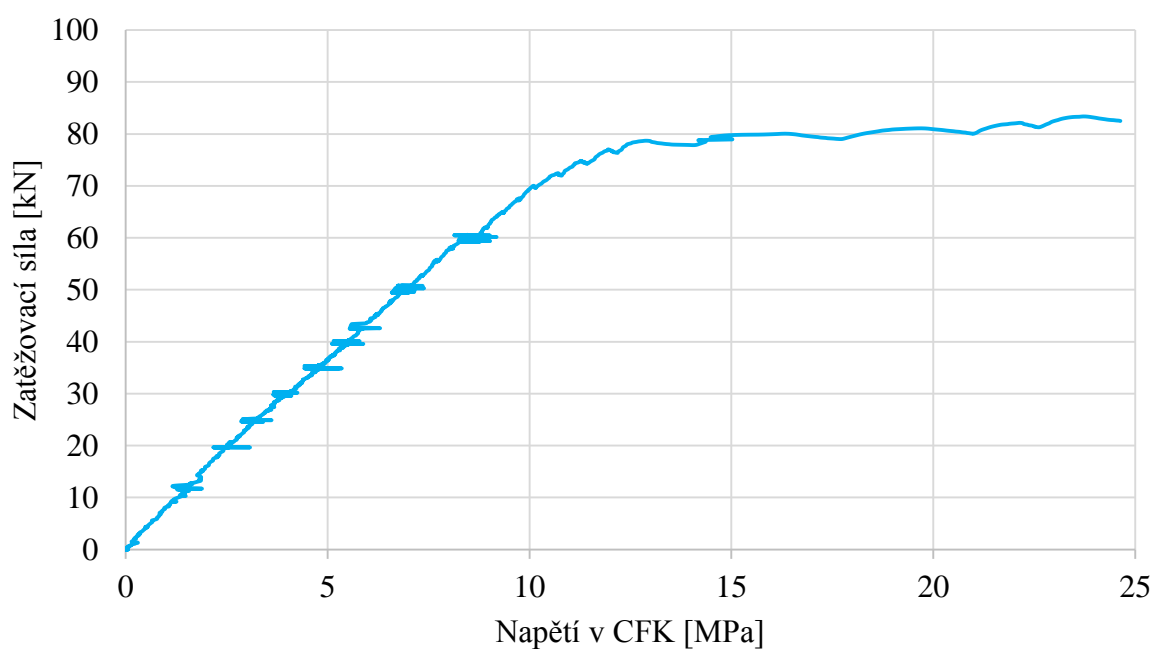
Časový průběh zatěžovací zkoušky zesíleného prvku

Napětí betonu v horních tlačných vláknech uprostřed -
v 1/2

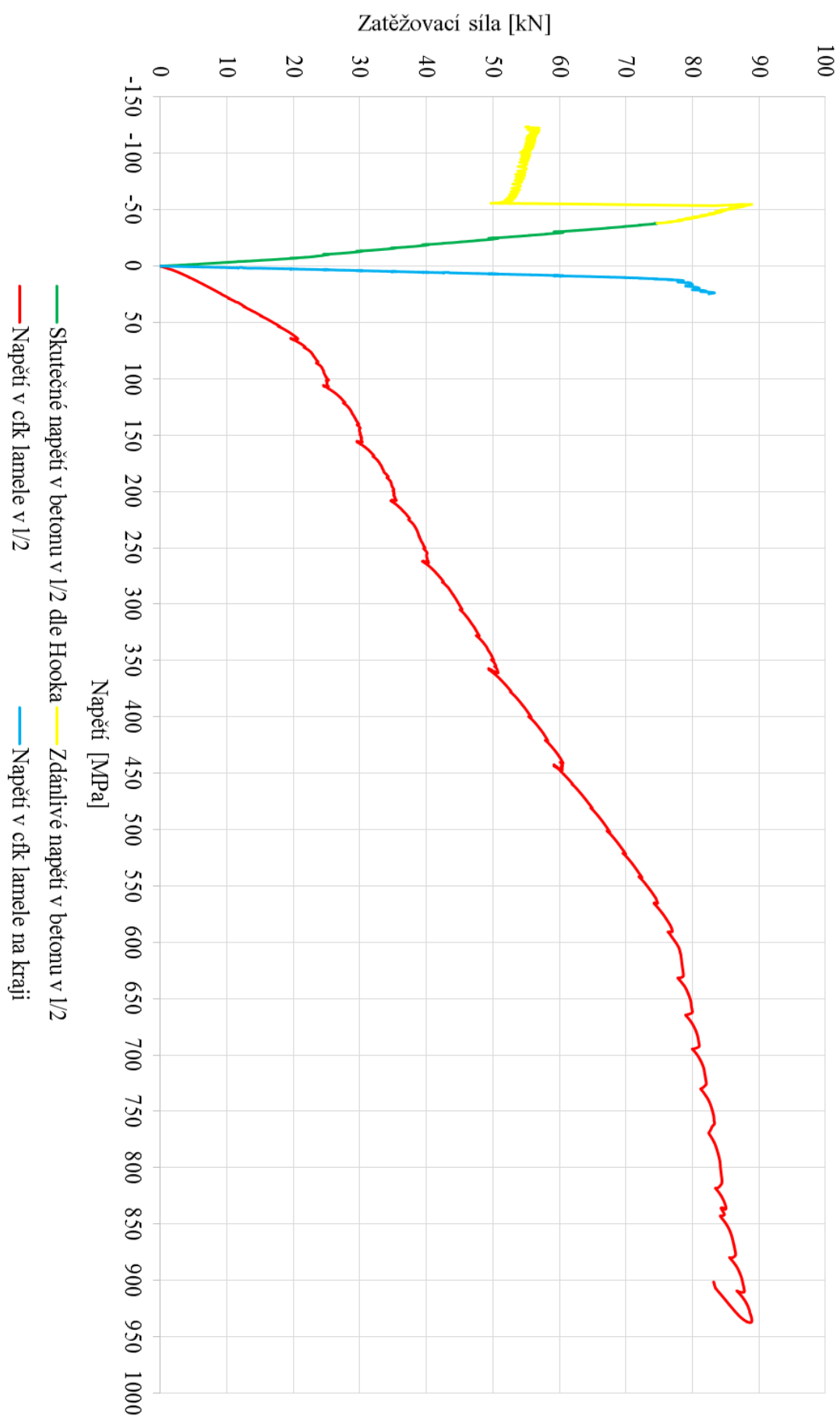
Napětí v CFK lamele uprostřed - v 1/2



Napětí v CFK lamele na kraji



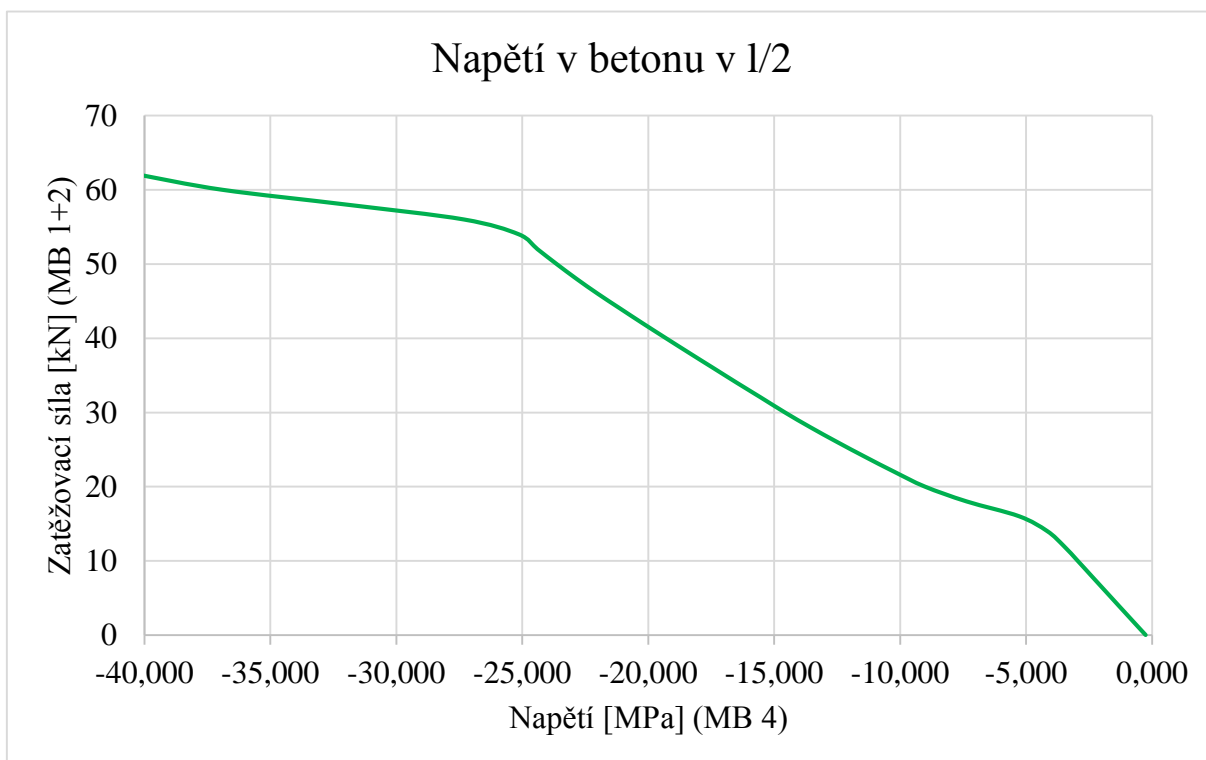
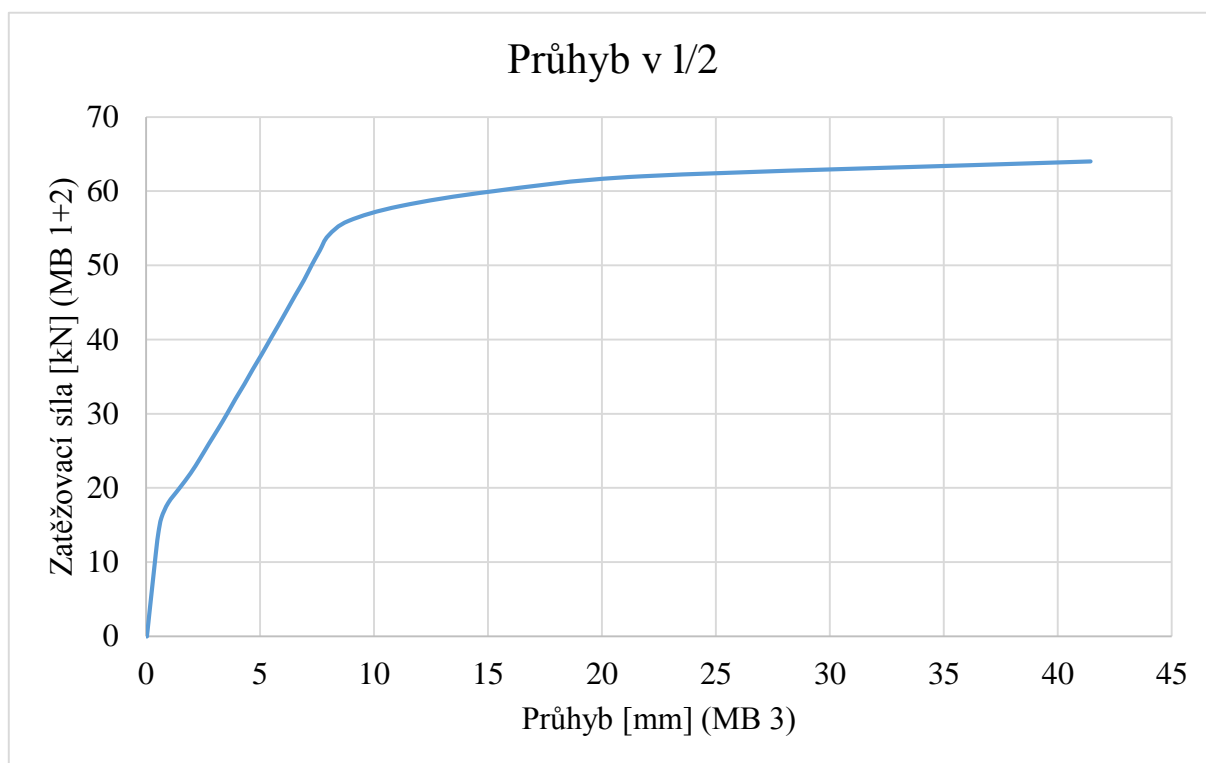
Napětí v betonu a v cfk lamele



**PŘÍLOHA P5 – VYHODNOCENÍ NUMERICKÉ
ANALÝZY**

P 5.1 VÝSTUPY ANALÝZY NEZESÍLENÉHO PRVKU

Výstupy monitorovacích bodů

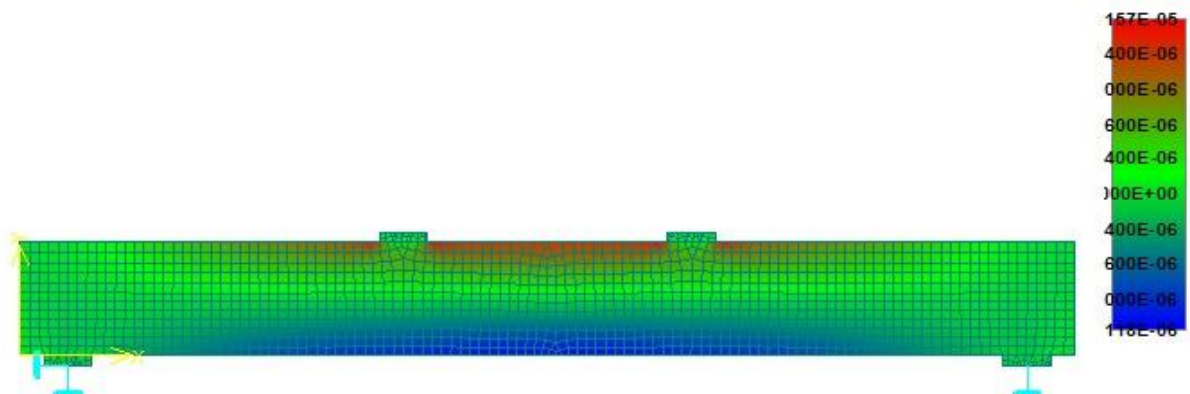


Grafické výstupy – přetvoření v betonu + trhliny

1. zatěžovací krok – vlastní tíha

Krok 1,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, <-1.157E-05;9.118E-06>[None]

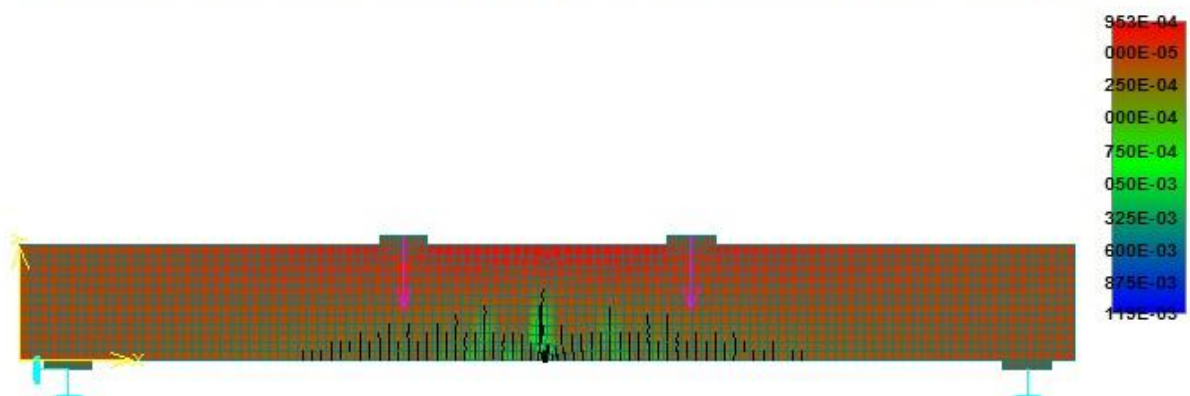


10. zatěžovací krok

Krok 10,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, <-2.953E-04;2.119E-03>[None]

Trhliny: v prvcích, otevření: <1.020E-09;6.593E-05>[m], Sigma_N: <3.829E-01;3.192E+00>[MPa], Sigma_T: <-1.204E+00;6.142E-01>

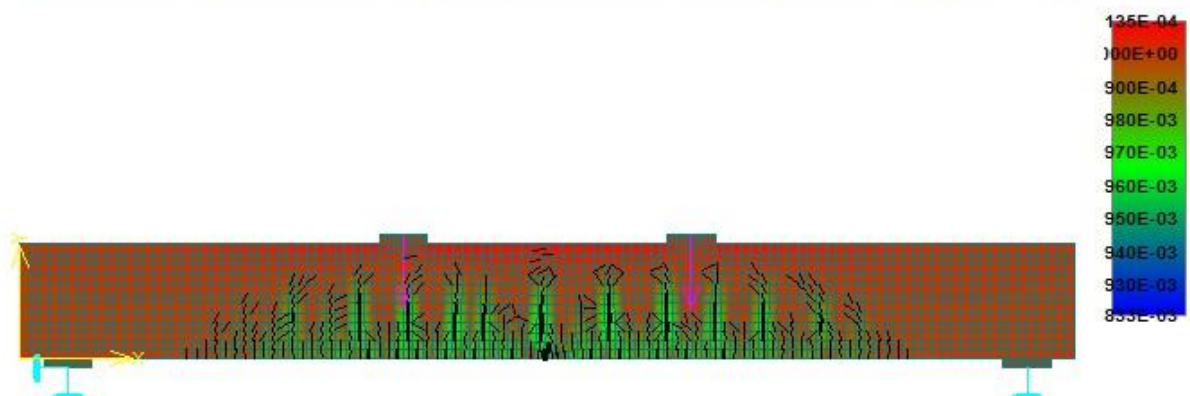


20. zatěžovací krok

Krok 20,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, <-9.135E-04;7.833E-03>[None]

Trhliny: v prvcích, otevření: <-1.019E-07;2.503E-04>[m], Sigma_N: <0.000E+00;3.190E+00>[MPa], Sigma_T: <-1.500E+00;1.803E+00>

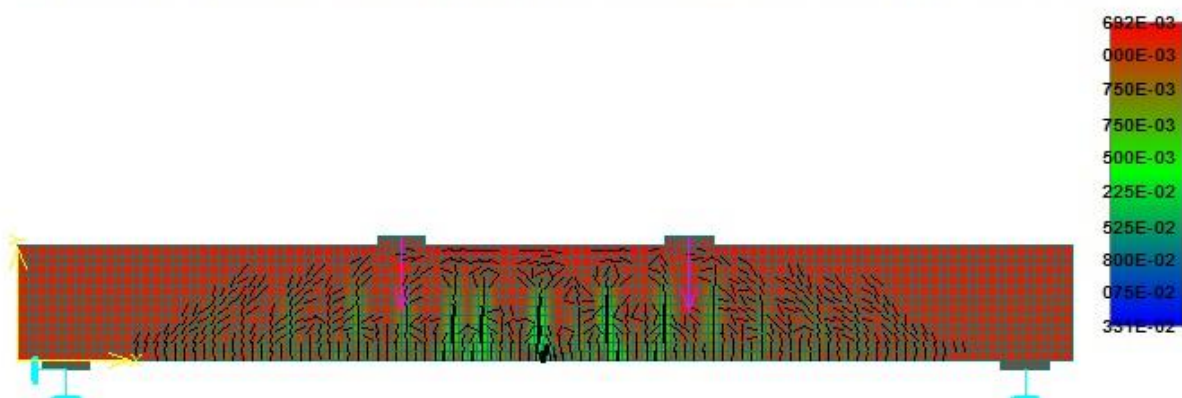


30. zatěžovací krok

Krok 30.

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, $\langle -1.692\text{E-}03; 2.331\text{E-}02 \rangle$ [None]

Trhliny: v prvcích, otevření: $\langle -1.122\text{E-}06; 7.721\text{E-}04 \rangle$ [m], Sigma_N: $\langle -1.013\text{E+}00; 3.136\text{E+}00 \rangle$ [MPa], Sigma_T: $\langle -2.239\text{E+}00; 1.988\text{E+}00 \rangle$ [MPa]

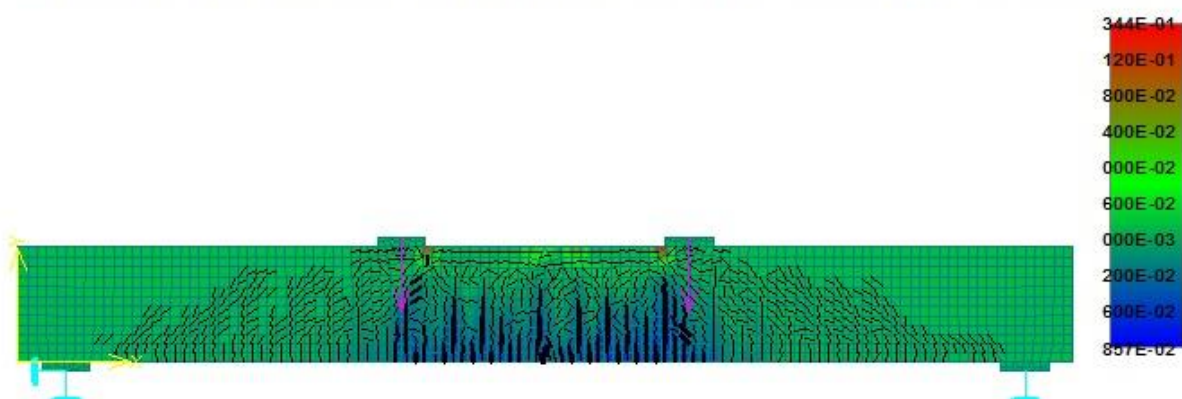


34. zatěžovací krok – maximální zatížení prvku

Krok 34.

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, $\langle -1.344\text{E-}01; 7.857\text{E-}02 \rangle$ [None]

Trhliny: v prvcích, otevření: $\langle -8.823\text{E-}04; 2.473\text{E-}03 \rangle$ [m], Sigma_N: $\langle -7.151\text{E+}01; 4.618\text{E+}01 \rangle$ [MPa], Sigma_T: $\langle -3.192\text{E+}00; 3.192\text{E+}00 \rangle$ [MPa]

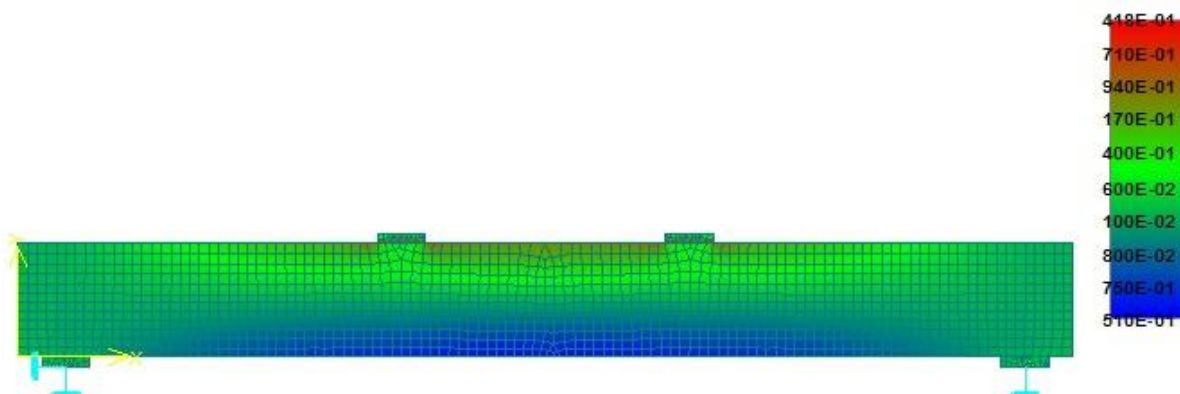


Grafické výstupy – napětí v betonu + trhliny

1. zatěžovací krok – vlastní tíha

Krok 1.

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, <-4.418E-01;2.510E-01>[MPa]

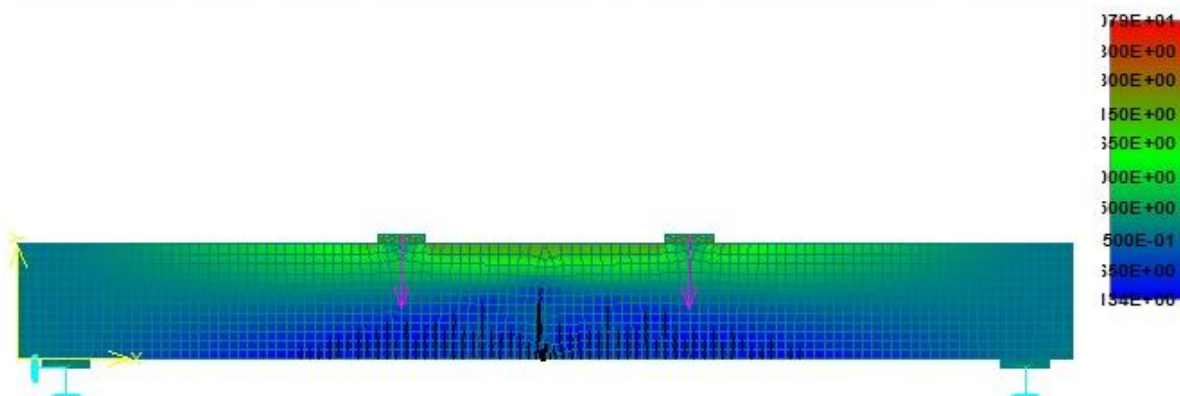


10. zatěžovací krok

Krok 10.

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, <-1.079E+01;3.134E+00>[MPa]

Trhliny: v prvcích, otevření: <1.020E-09;6.593E-05>[m], Sigma_N: <3.829E-01;3.192E+00>[MPa], Sigma_T: <-1.204E+00;6.142E-01>

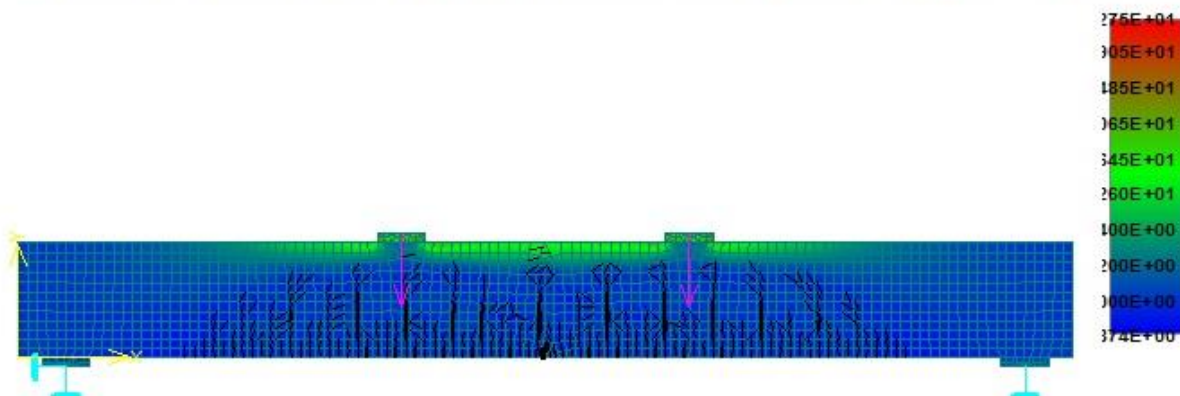


20. zatěžovací krok

Krok 20.

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, <-3.275E+01;3.874E+00>[MPa]

Trhliny: v prvcích, otevření: <-1.019E-07;2.503E-04>[m], Sigma_N: <0.000E+00;3.190E+00>[MPa], Sigma_T: <-1.500E+00;1.803E+00>

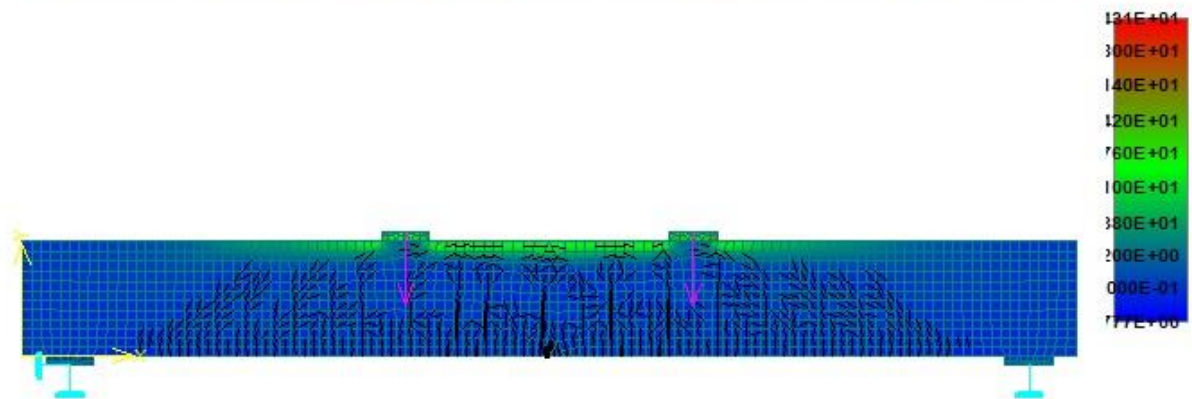


30. zatěžovací krok

Krok 30,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, <-5.431E+01;5.777E+00>[MPa]

Trhliny: v prvcích, otevření: <-1.122E-06;7.721E-04>[m], Sigma_N: <-1.013E+00;3.136E+00>[MPa], Sigma_T: <-2.239E+00;1.988E+00>[MPa]

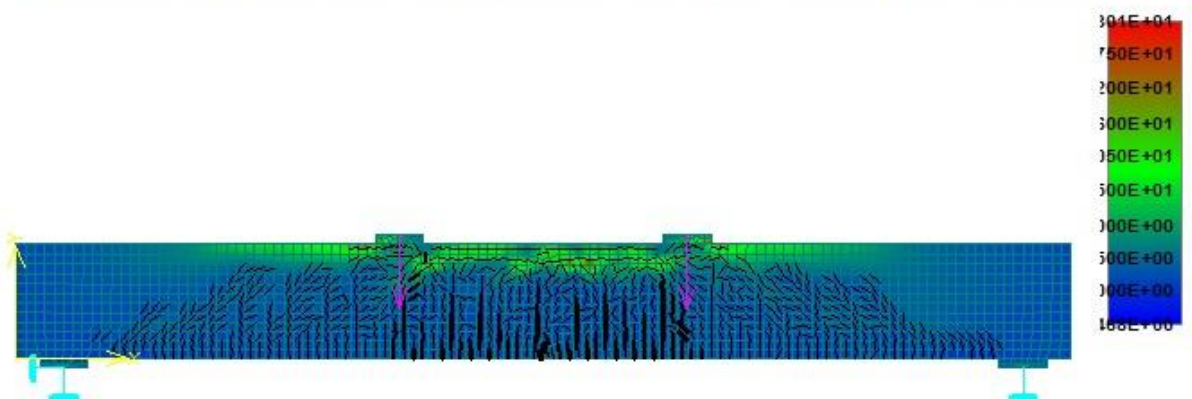


34. zatěžovací krok – maximální zatížení prvku

Krok 34,

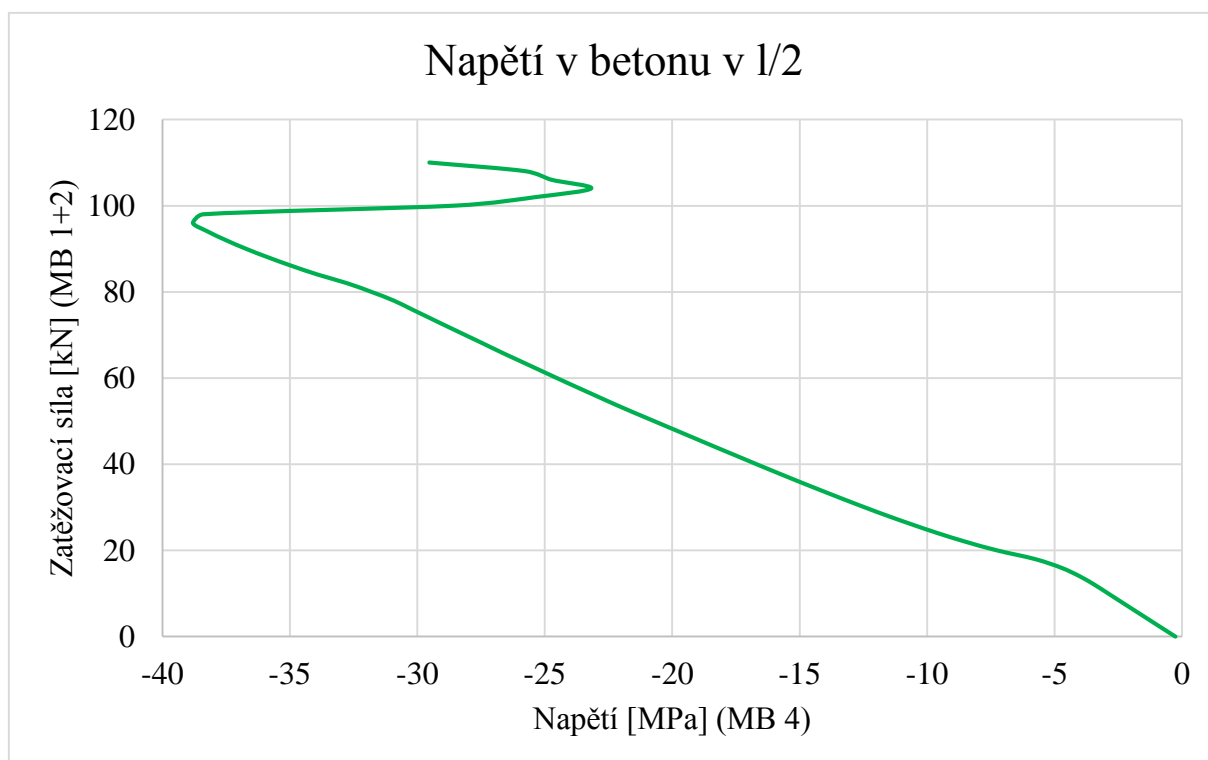
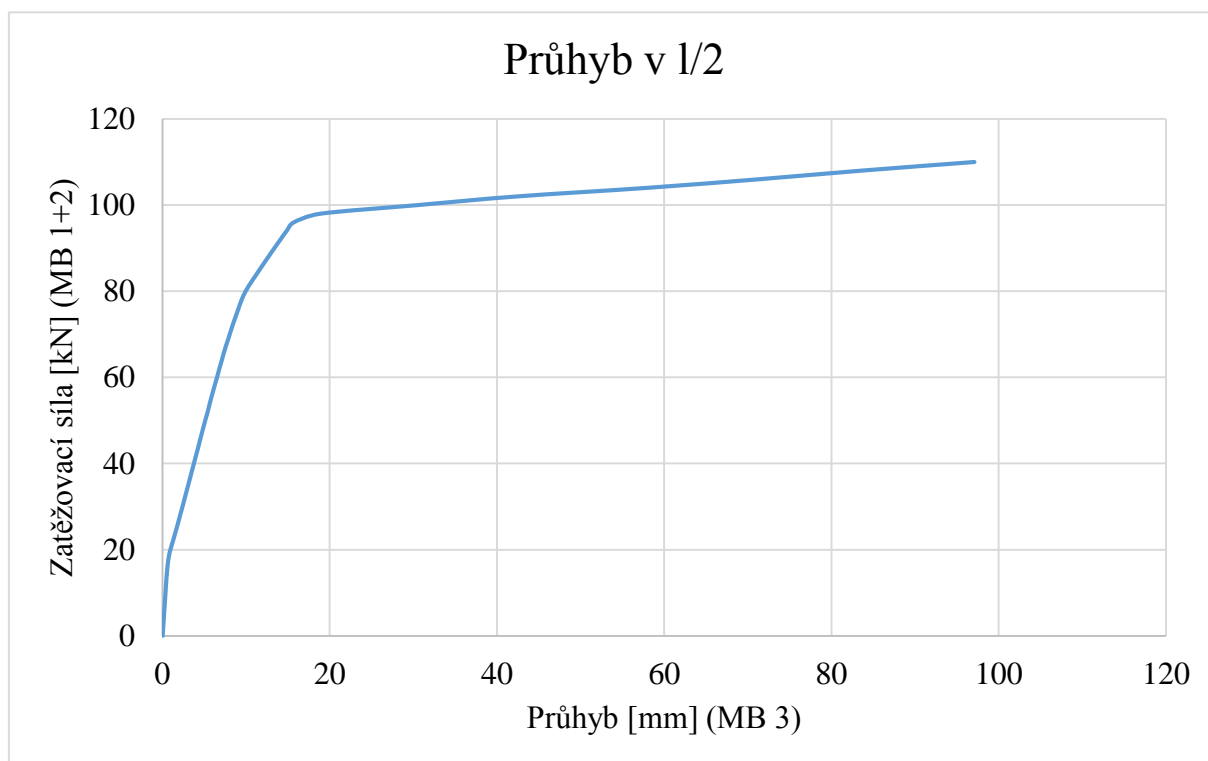
Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, <-4.301E+01;7.468E+00>[MPa]

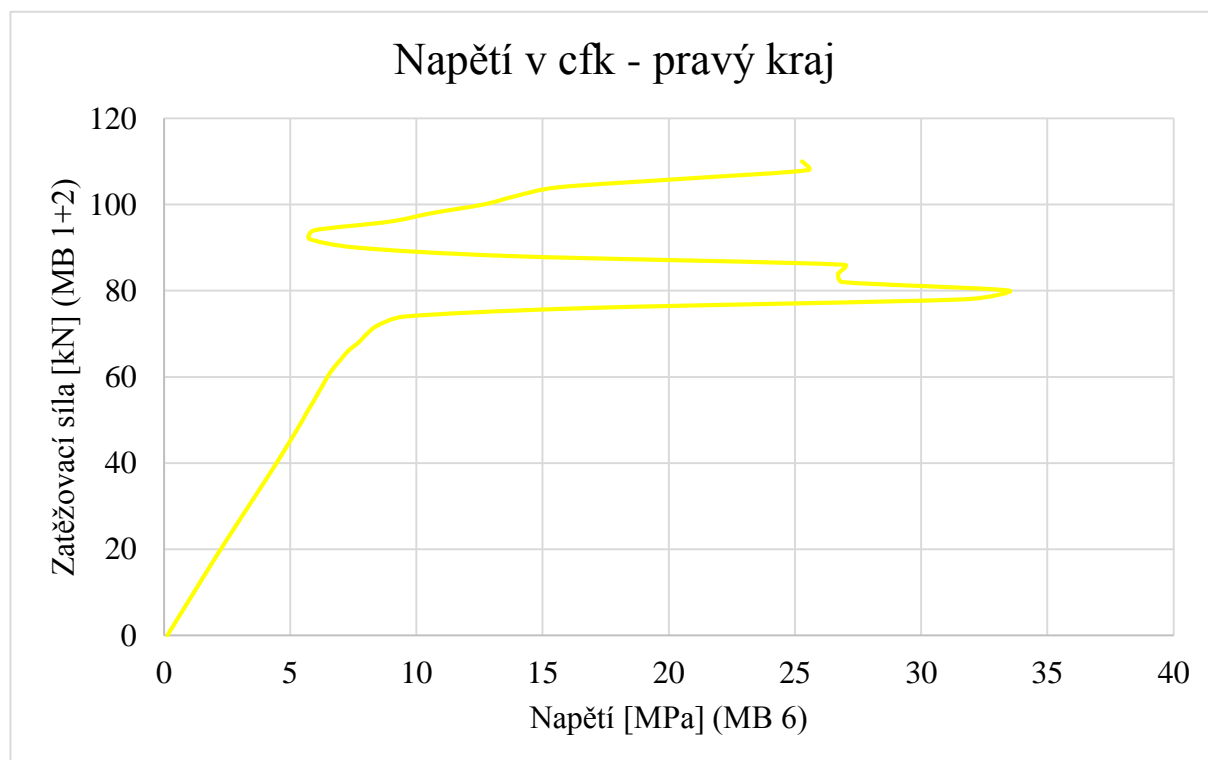
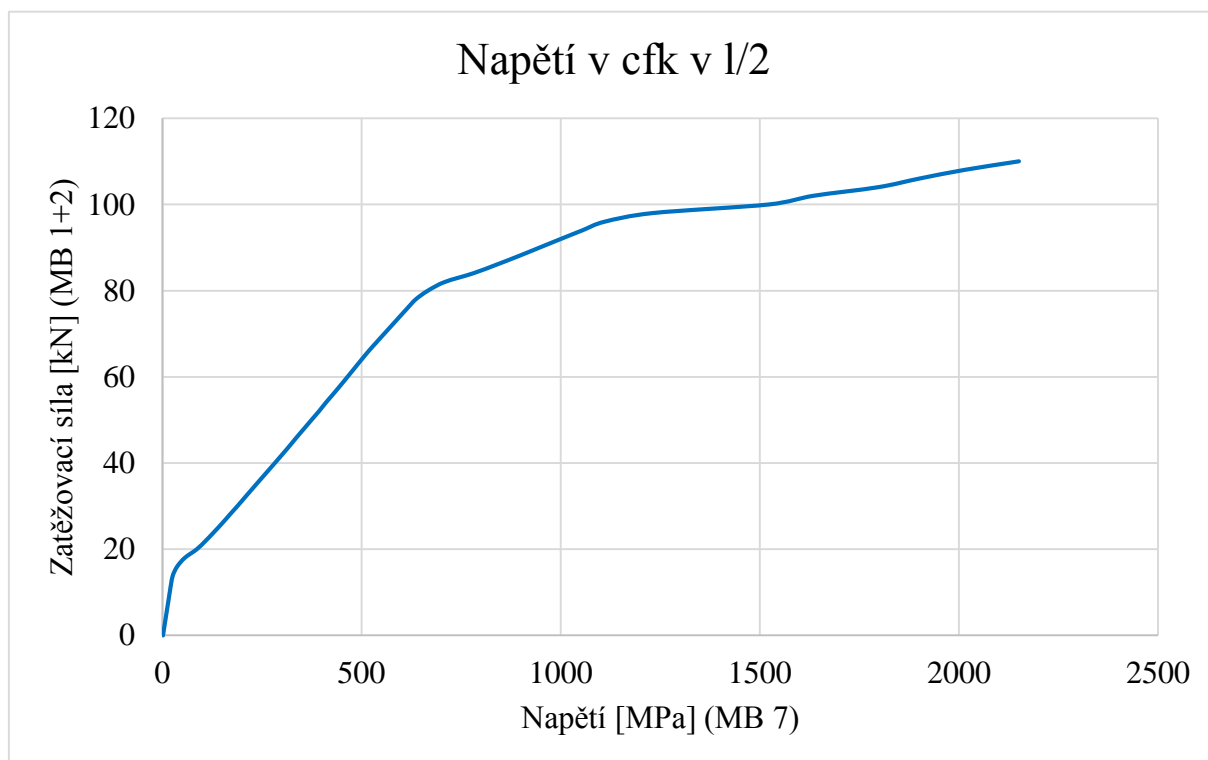
Trhliny: v prvcích, otevření: <-8.823E-04;2.473E-03>[m], Sigma_N: <-7.151E+01;4.618E+01>[MPa], Sigma_T: <-3.192E+00;3.192E+00>[MPa]

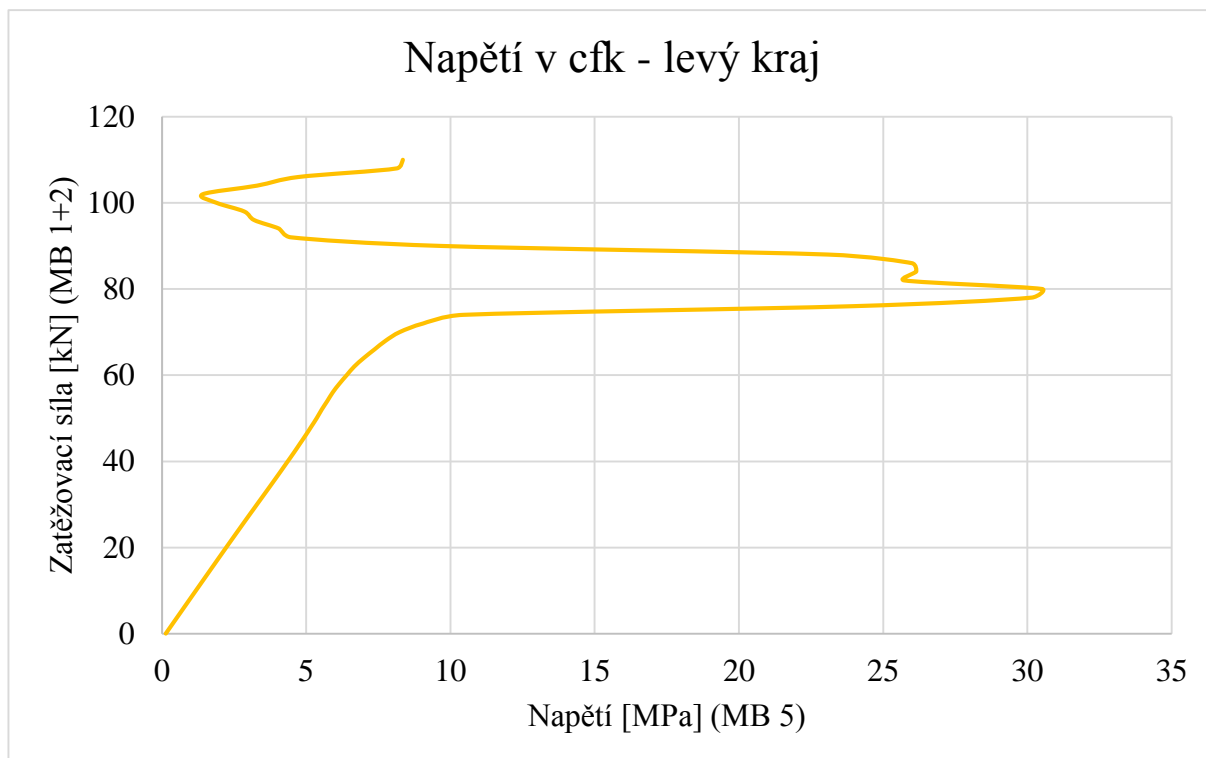


P 5.2 VÝSTUPY ANALÝZY ZESÍLENÉHO PRVKU

Výstupy monitorovacích bodů



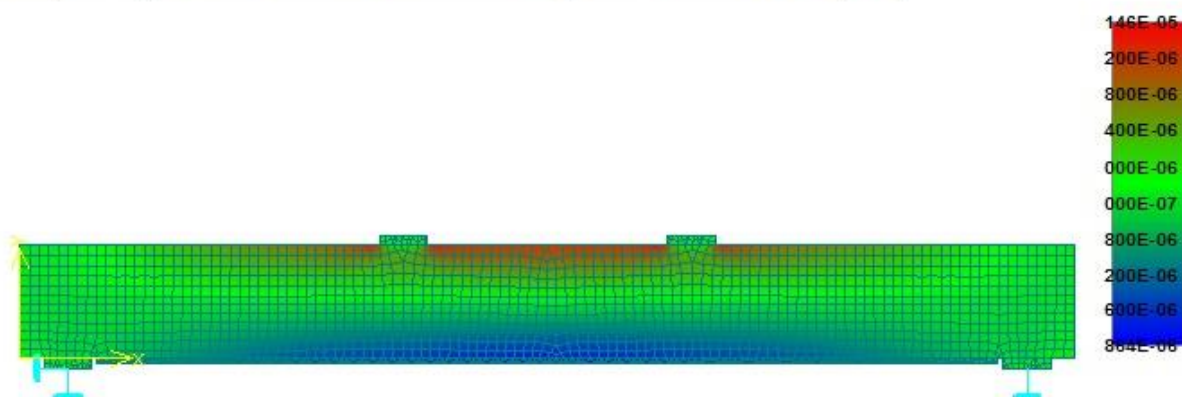




Grafické výstupy – přetvoření v betonu + trhliny

1. zatěžovací krok – vlastní tíha

Krok 1,
Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, <-1.146E-05;9.864E-06> [None]

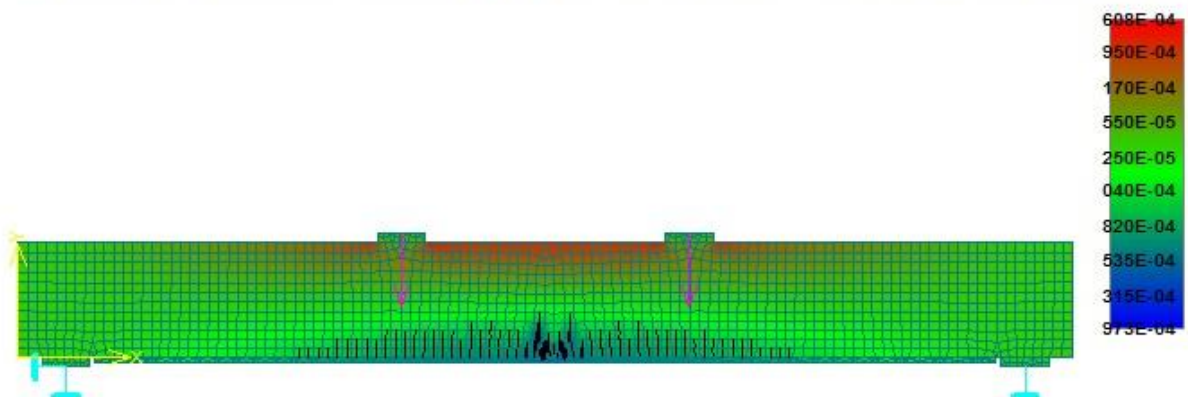


10. zatěžovací krok

Krok 10,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, <-2.608E-04;3.973E-04>[None]

Trhliny: v prvcích, otevření: <1.571E-08;1.107E-05>[m], Sigma_N: <1.768E+00;3.189E+00>[MPa], Sigma_T: <-2.309E-01;2.502E-01>

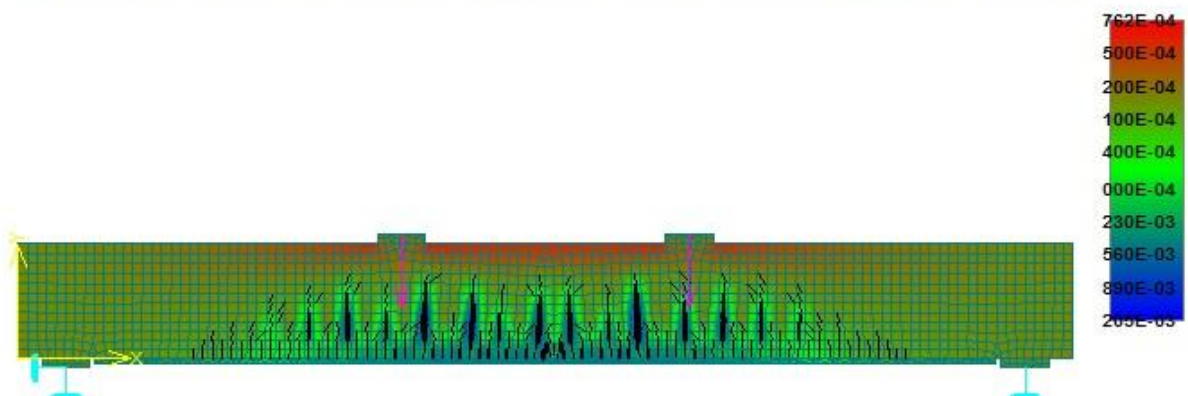


20. zatěžovací krok

Krok 20,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, <-7.762E-04;2.205E-03>[None]

Trhliny: v prvcích, otevření: <-1.357E-07;9.714E-05>[m], Sigma_N: <-8.301E-02;3.189E+00>[MPa], Sigma_T: <-1.371E+00;2.011E+00>

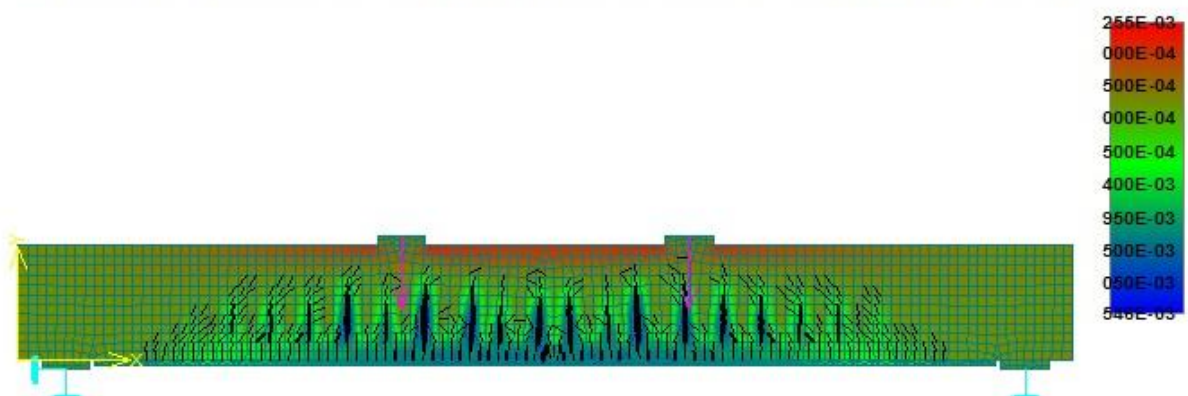


30. zatěžovací krok

Krok 30,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, <-1.255E-03;3.546E-03>[None]

Trhliny: v prvcích, otevření: <-3.162E-07;1.610E-04>[m], Sigma_N: <-3.854E-01;3.183E+00>[MPa], Sigma_T: <-1.754E+00;2.080E+00>

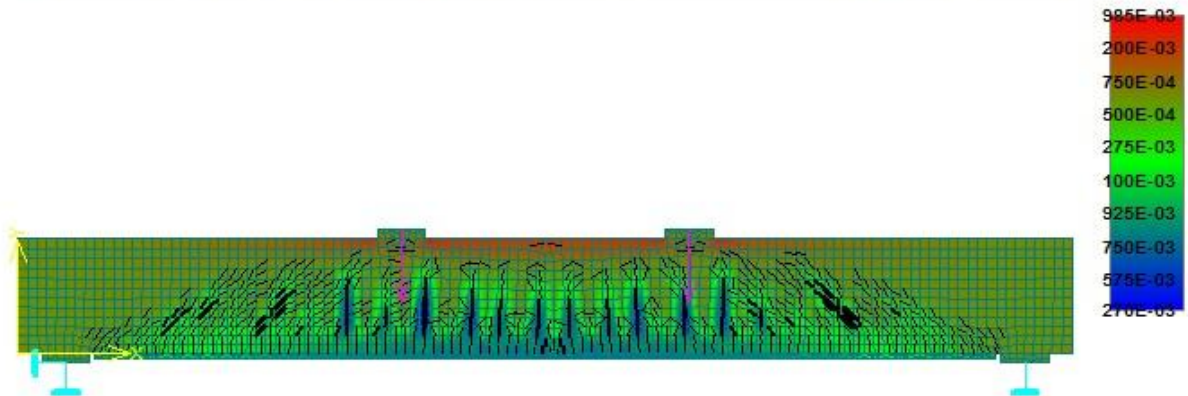


40. zatěžovací krok

Krok 40,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, <-1.985E-03;5.270E-03>[None]

Trhliny: v prvoích, otevření: <-8.928E-07;3.303E-04>[m], Sigma_N: <-7.736E-01;3.166E+00>[MPa], Sigma_T: <-2.928E+00;2.219E+0

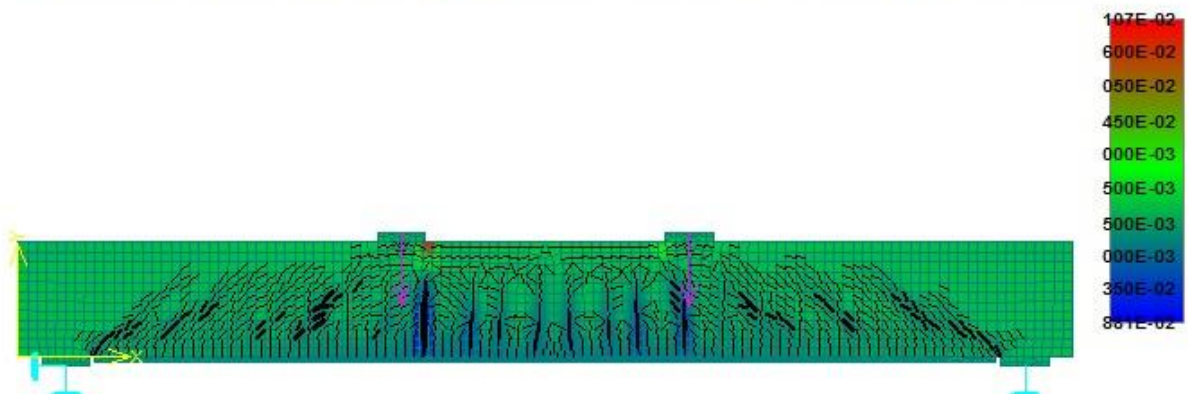


50. zatěžovací krok – maximální zatížení prvku

Krok 50,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, <-3.107E-02;1.881E-02>[None]

Trhliny: v prvoích, otevření: <-9.616E-05;8.246E-04>[m], Sigma_N: <-5.011E+01;3.178E+00>[MPa], Sigma_T: <-3.192E+00;3.058E+0

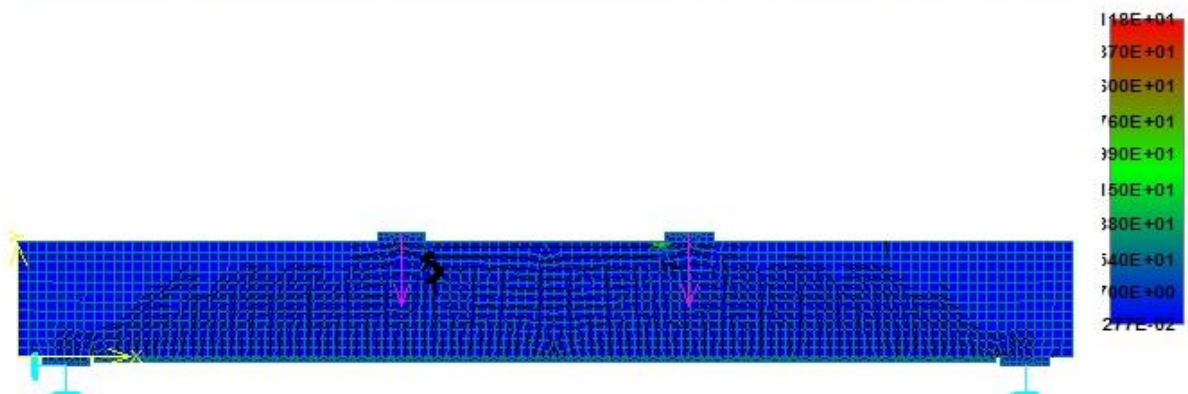


56. zatěžovací krok – poslední výpočtový krok

Krok 56,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Strain, Eps xx, <-7.118E+01;4.277E-02>[None]

Trhliny: v prvoích, otevření: <-1.544E-02;1.872E-03>[m], Sigma_N: <-2.579E+01;6.388E+01>[MPa], Sigma_T: <-3.192E+00;3.192E+0

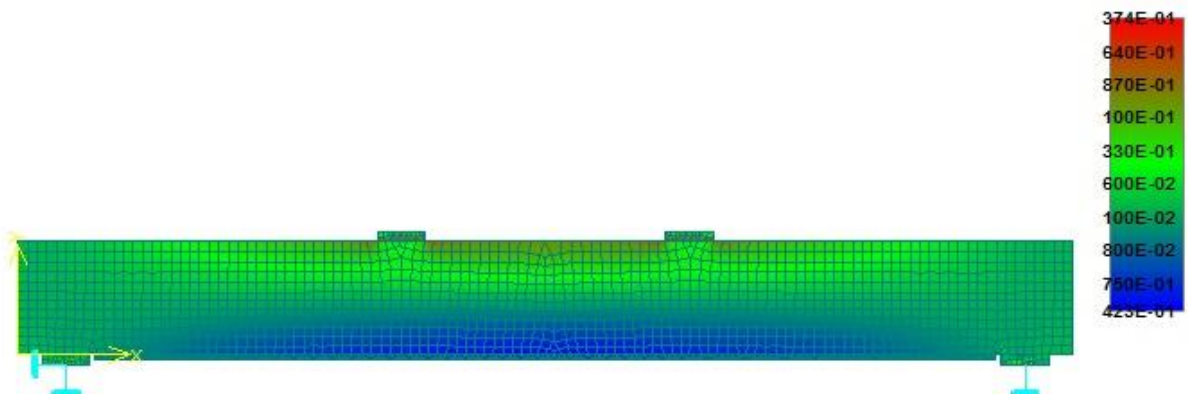


Grafické výstupy – napětí v betonu + trhliny

1. zatěžovací krok – vlastní tíha

Krok 1,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, <-4.374E-01;2.423E-01>[MPa]

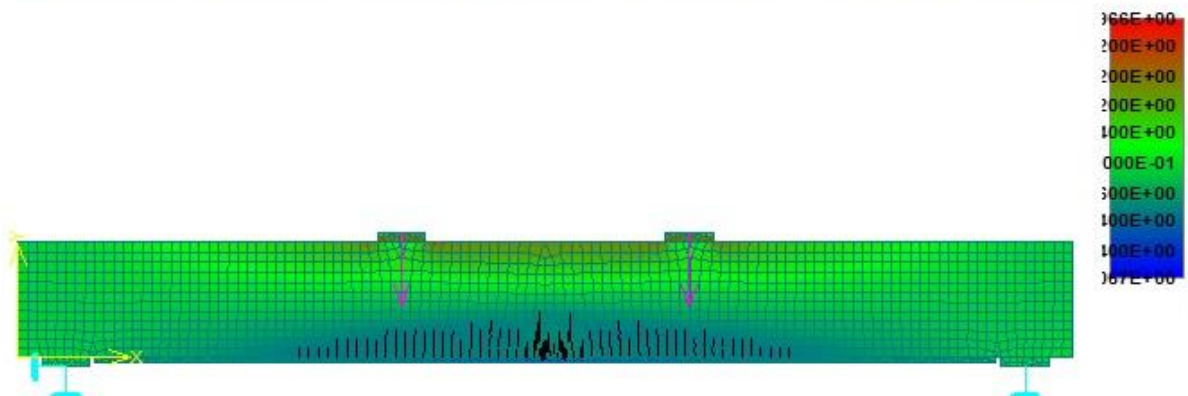


10. zatěžovací krok

Krok 10,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, <-9.966E+00;7.067E+00>[MPa]

Trhliny: v prvcích, otevření: <1.571E-08;1.107E-05>[m], Sigma_N: <1.768E+00;3.189E+00>[MPa], Sigma_T: <-2.309E-01;2.502E-01>

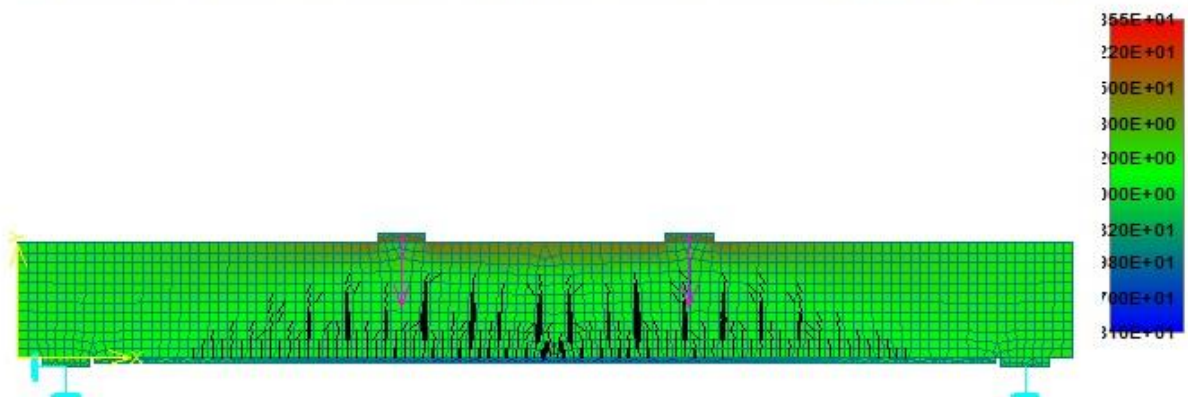


20. zatěžovací krok

Krok 20,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, <-2.855E+01;3.310E+01>[MPa]

Trhliny: v prvcích, otevření: <-1.357E-07;9.714E-05>[m], Sigma_N: <-8.301E-02;3.189E+00>[MPa], Sigma_T: <-1.371E+00;2.011E+00>

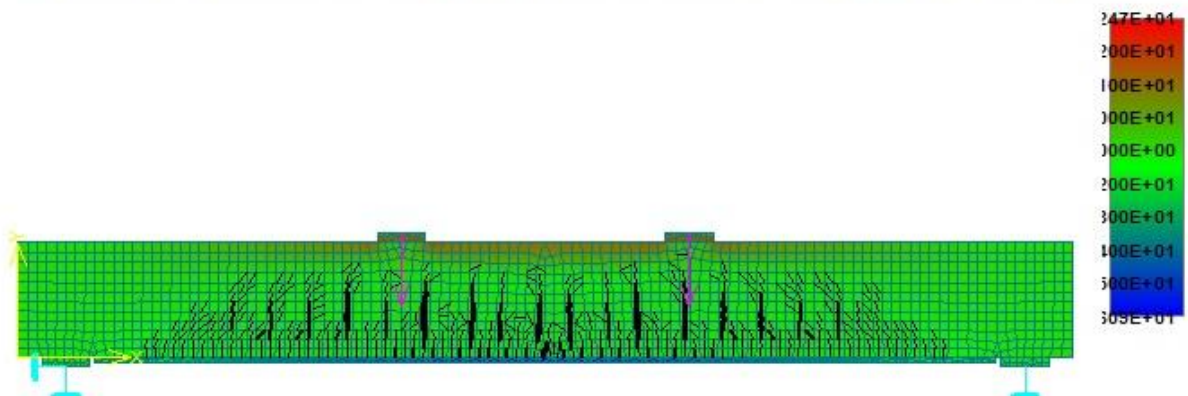


30. zatěžovací krok

Krok 30,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, $\langle -4.247\text{E}+01; 5.609\text{E}+01 \rangle$ [MPa]

Trhliny: v prvcích, otevření: $\langle -3.162\text{E}-07; 1.610\text{E}-04 \rangle$ [m], Sigma_N: $\langle -3.854\text{E}-01; 3.183\text{E}+00 \rangle$ [MPa], Sigma_T: $\langle -1.754\text{E}+00; 2.080\text{E}+00 \rangle$

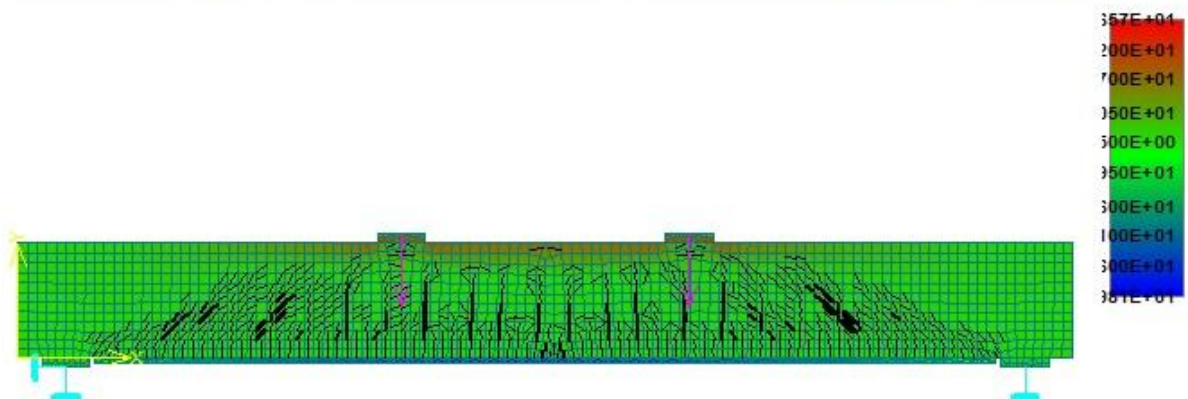


40. zatěžovací krok

Krok 40,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, $\langle -5.657\text{E}+01; 7.981\text{E}+01 \rangle$ [MPa]

Trhliny: v prvcích, otevření: $\langle -8.928\text{E}-07; 3.303\text{E}-04 \rangle$ [m], Sigma_N: $\langle -7.736\text{E}-01; 3.166\text{E}+00 \rangle$ [MPa], Sigma_T: $\langle -2.928\text{E}+00; 2.219\text{E}+00 \rangle$

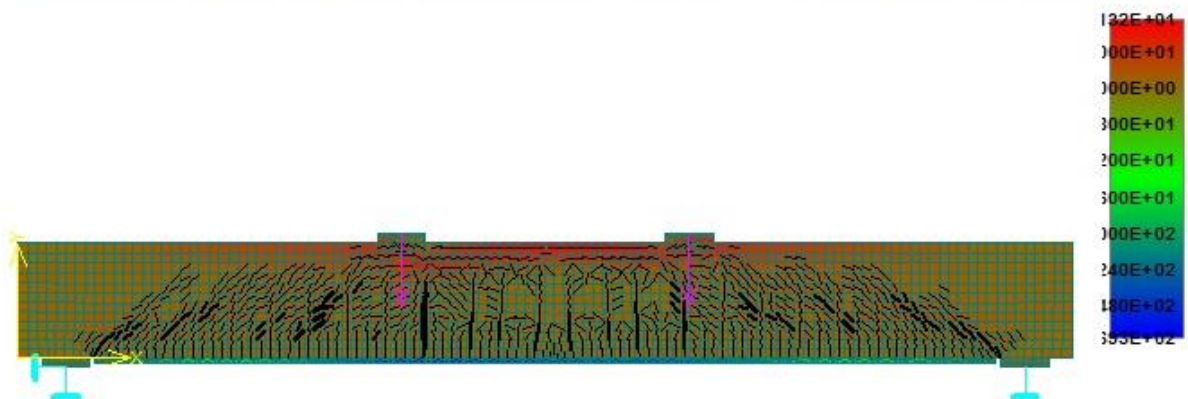


50. zatěžovací krok – maximální zatížení prvku

Krok 50,

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, $\langle -4.132\text{E}+01; 1.693\text{E}+02 \rangle$ [MPa]

Trhliny: v prvcích, otevření: $\langle -9.616\text{E}-05; 8.246\text{E}-04 \rangle$ [m], Sigma_N: $\langle -5.011\text{E}+01; 3.178\text{E}+00 \rangle$ [MPa], Sigma_T: $\langle -3.192\text{E}+00; 3.058\text{E}+00 \rangle$

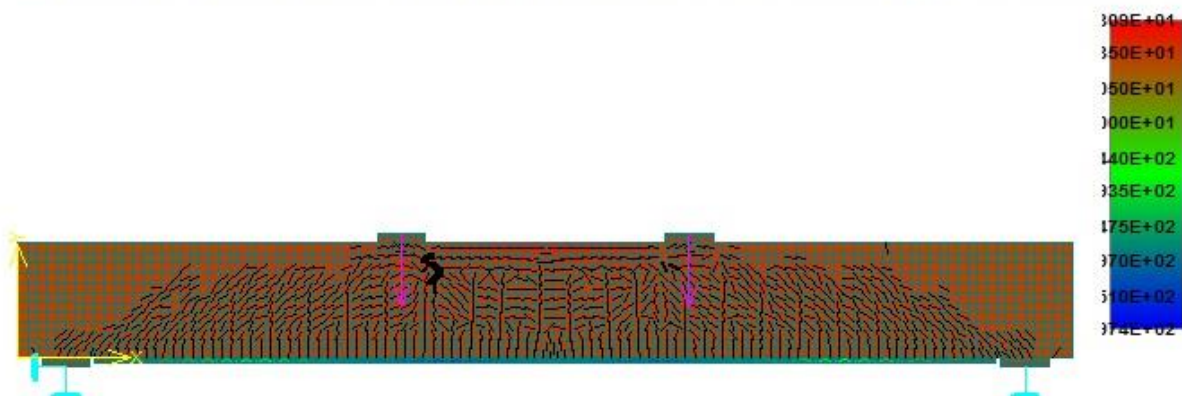


56. zatěžovací krok – poslední zatěžovací krok

Krok 56.

Skaláry: barevný přechod, základní materiál, v uzlech, Stress, Sigma xx, <-6.309E+01;3.974E+02>[MPa]

Trhliny: v prvcích, otevření: <-1.544E-02;1.872E-03>[m], Sigma_N: <-2.579E+01;6.388E+01>[MPa], Sigma_T: <-3.192E+00;3.192E+00>[MPa]



PŘÍLOHA P6 – FOTODOKUMENTACE

P 6.1 DOPROVODNÉ ZKOUŠKY



Obrázek P-1 Krychle v lisu před měřením pevnosti betonu v tlaku



Obrázek P-2 Krychle v lisu po měření pevnosti betonu v tlaku



*Obrázek P-3 Trámv lisu před měřením
pevnosti betonu v tlaku*



*Obrázek P-4 Trám v lisu po měření
pevnosti betonu v tlaku*



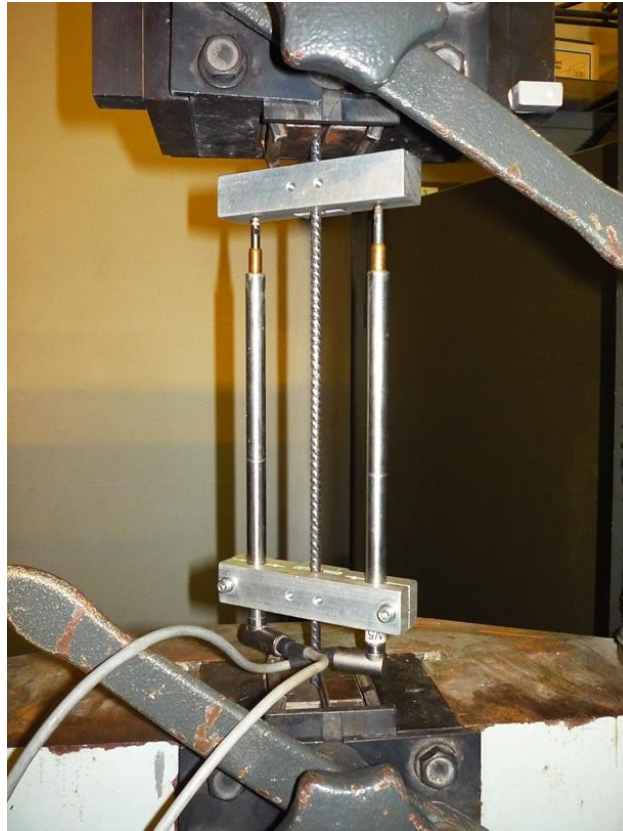
Obrázek P-5 Měření modulu pružnosti betonu v tlaku v lisu s osazeným snímacím rámem



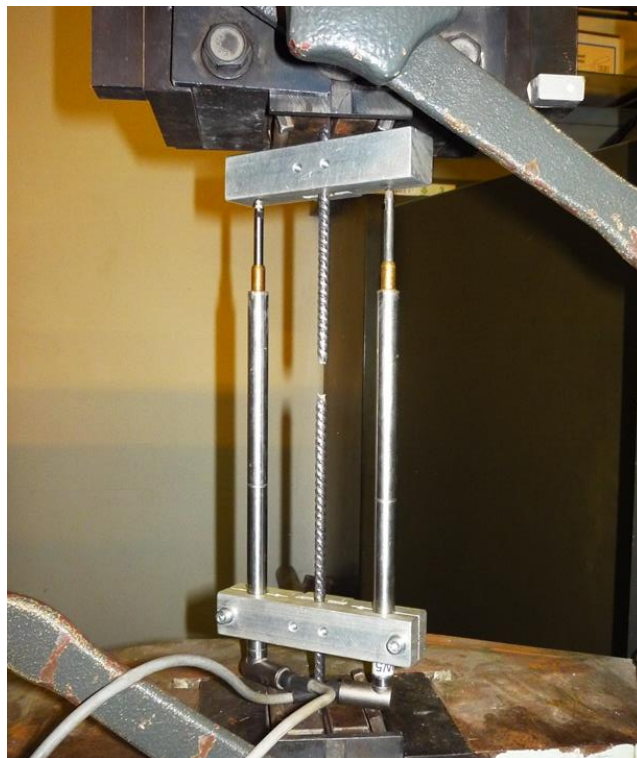
Obrázek P-6 Vzorky výztuže před tahovou zkouškou



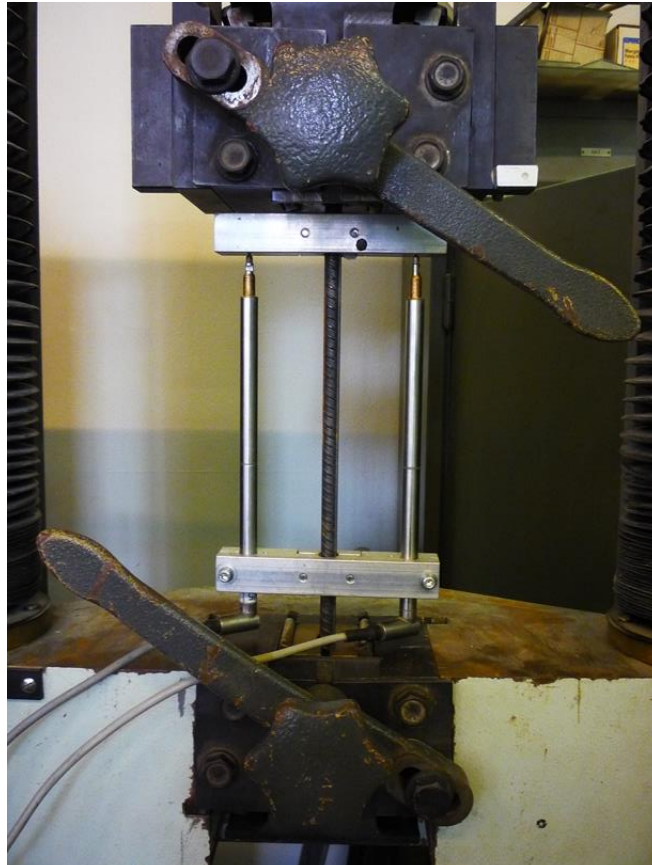
Obrázek P-7 Vzorky výztuže po tahové zkoušce



*Obrázek P-8 Vzorek výztuže prům. 6
v trhacím lisu před tahovou zkouškou*



*Obrázek P-9 Vzorek výztuže prům. 6
v trhacím lisu po tahové zkoušce*



*Obrázek P-10 Vzorek výztuže prům. 10
v trhacím lisu před tahovou zkouškou*



*Obrázek P-11 Vzorek výztuže prům. 10
v trhacím lisu po tahové zkoušce*

P 6.2 VÝROBA ZKUŠEBNÍCH PRVKŮ



Obrázek P-12 Betonáž zkušebních prvků



Obrázek P-13 Betonáž zkušebních prvků



Obrázek P-14 Vybetonovaná a zakrytá tělesa pro doprovodné zkoušky



Obrázek P-15 Vybetonované zkušební prvky po týdnu zrání

P 6.3 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA NEZESÍLENÉHO PRVKU



Obrázek P-16 Nezesílený prvek před osazením



Obrázek P-17 Podporová stolice a pravá podpora



Obrázek P-18 Podporová stolice a levá podpora



Obrázek P-19 Prvek uložený na podporách



Obrázek P-20 Prvek osazený snímači



Obrázek P-21 Odporový tenzometr na horním povrchu



Obrázek P-22 Potenciometrické snímače dráhy uprostřed prvku



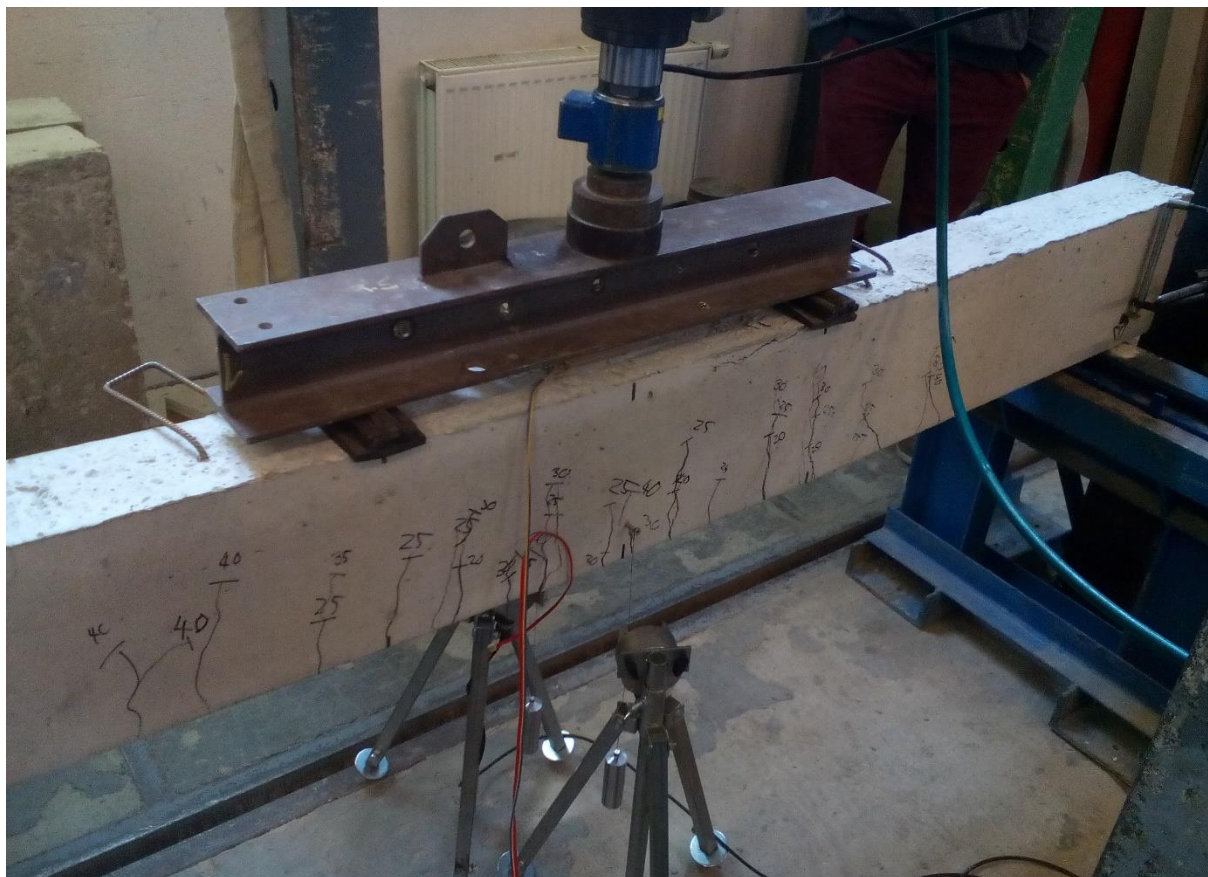
Obrázek P-23 Indukčnostní snímač poklesu podpory



Obrázek P-24 Zatěžování nezesíleného prvku



Obrázek P-25 Zakreslené trhliny v nezesíleném prvku



Obrázek P-25 Zakreslené trhliny v nezesíleném prvku

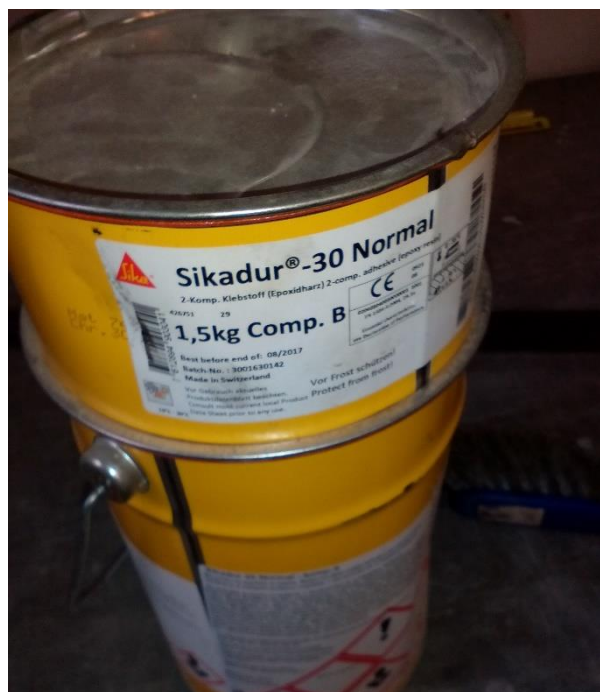


Obrázek P-26 Porušený nezesílený prvek



Obrázek P-27 Porušený nezesílený prvek

P 6.4 EXPERIMENTÁLNÍ ANALÝZA ZESÍLENÉHO PRVKU



Obrázek P-28 Lepidlo Sikadur 30 Normal



Obrázek P-30 Nanesení lepidla na cfk lamelu



Obrázek P-29 Uhlíková lamela cfk typ 50



Obrázek P-31 Vyvození přitlaku na přilepenou cfk lamelu



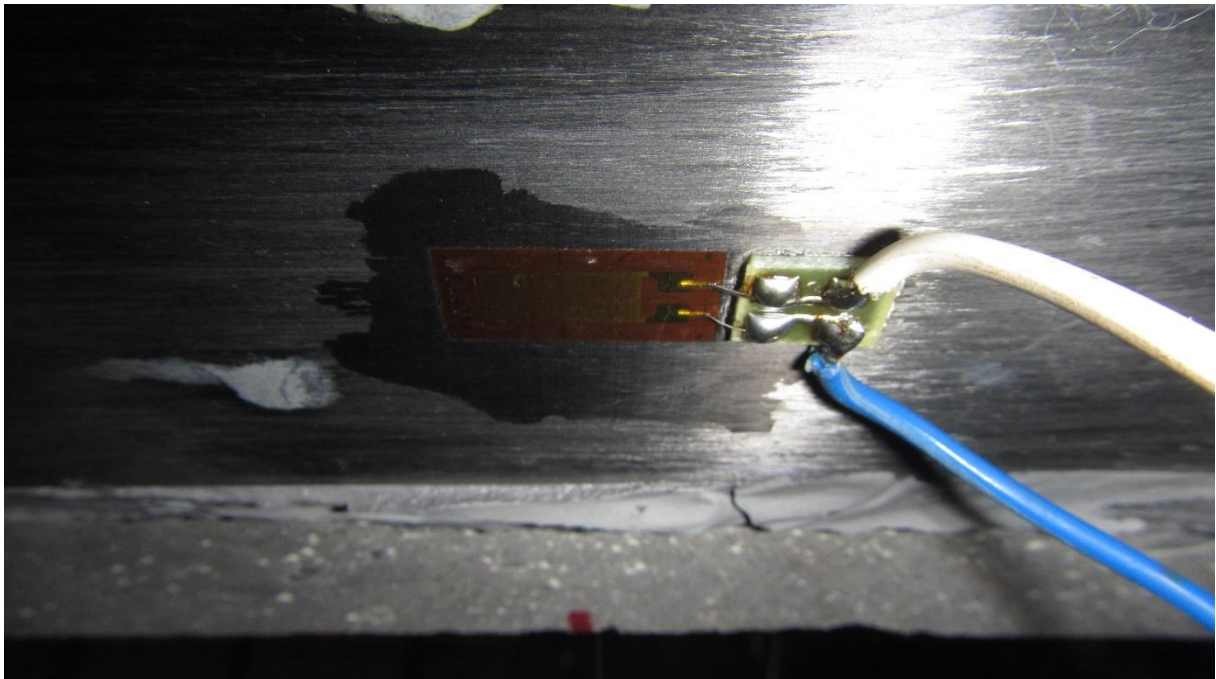
Obrázek P-32 Lepení odporového tenzometru na cfk lamelu



Obrázek P-33 Zesílený prvek před zatěžovací zkouškou



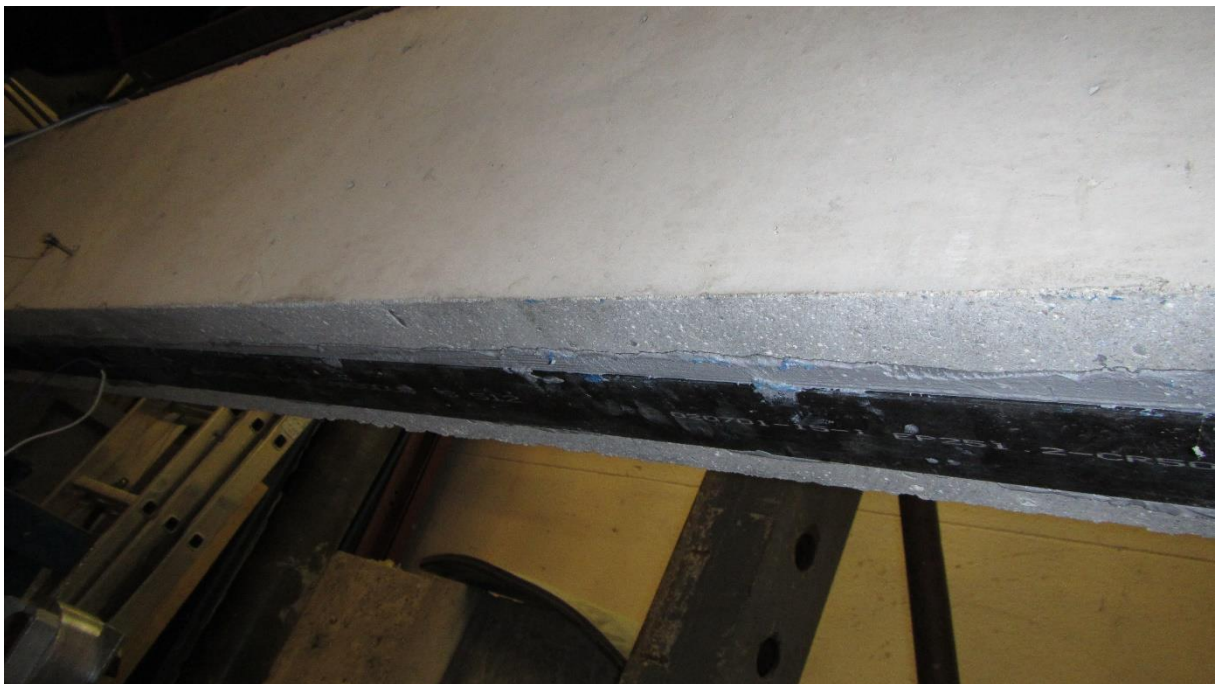
Obrázek P-34 Zesílený prvek před zatěžovací zkouškou



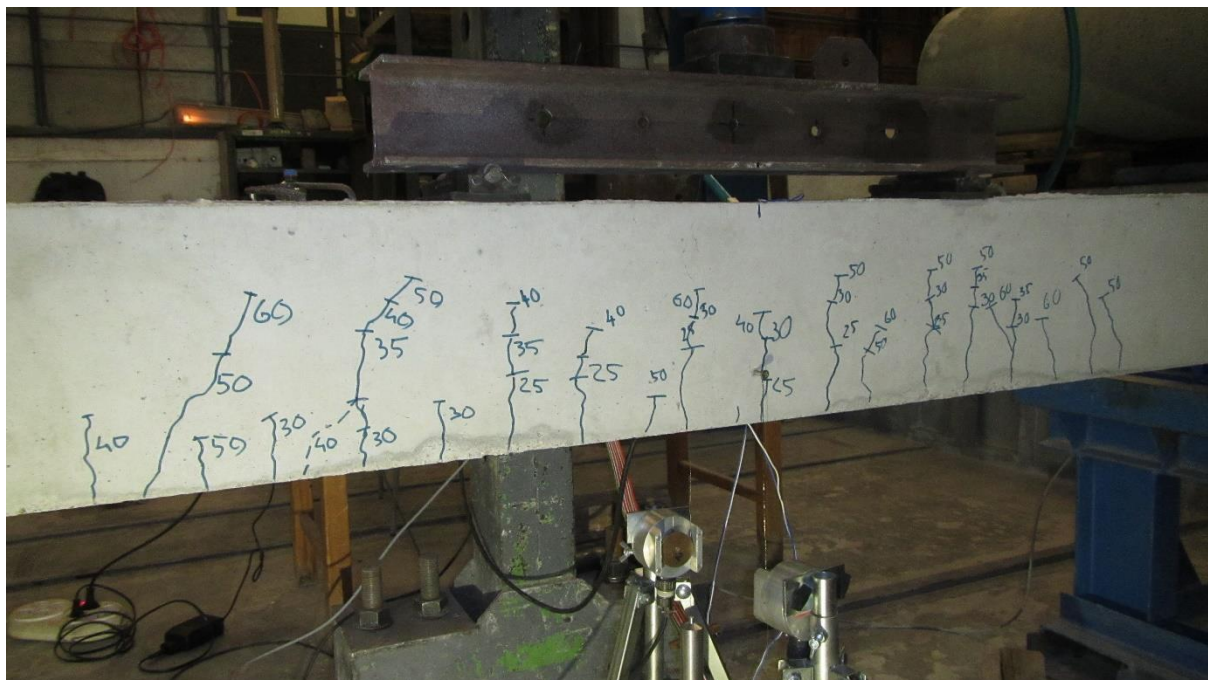
Obrázek P-35 Zapojený odporový tenzometr uprostřed cfk lamely



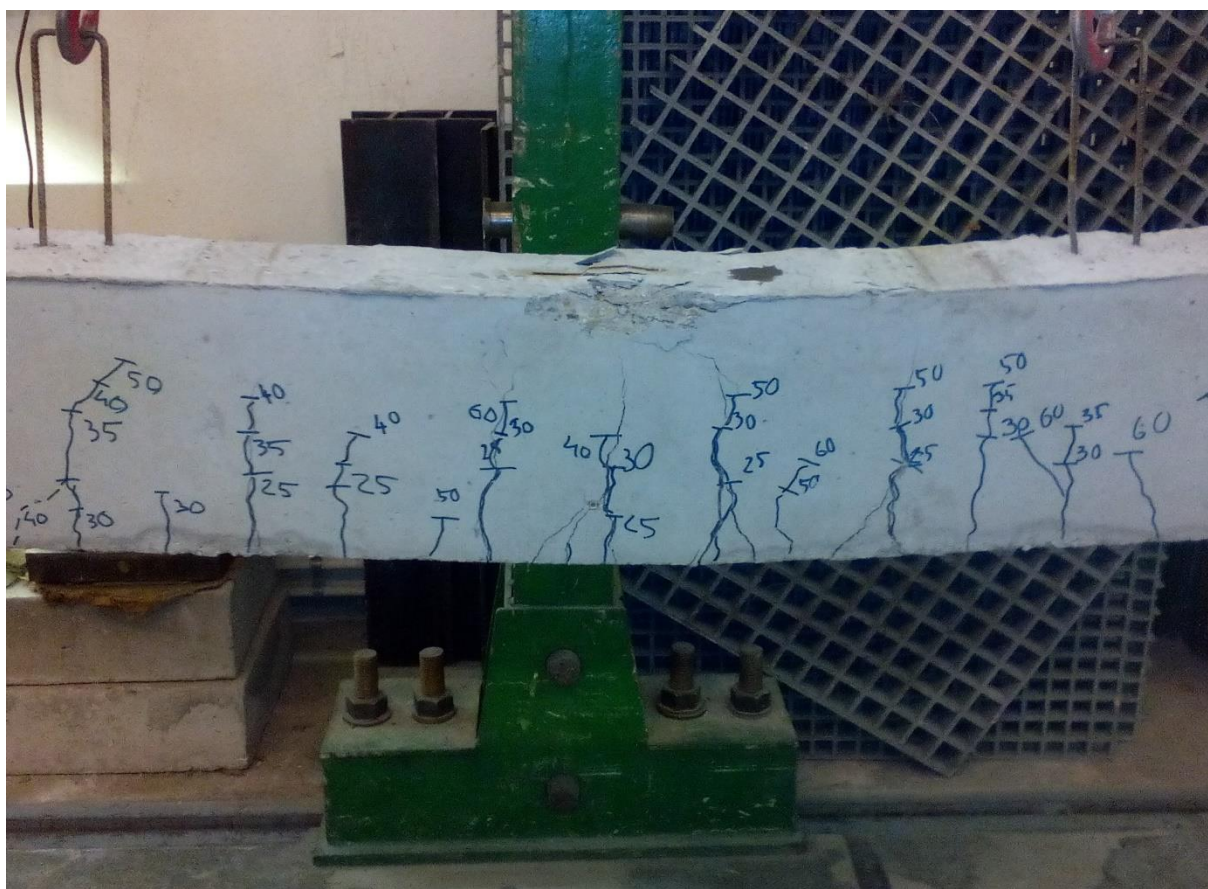
Obrázek P-36 Zapojený odporový tenzometr na kraji cfk lamely



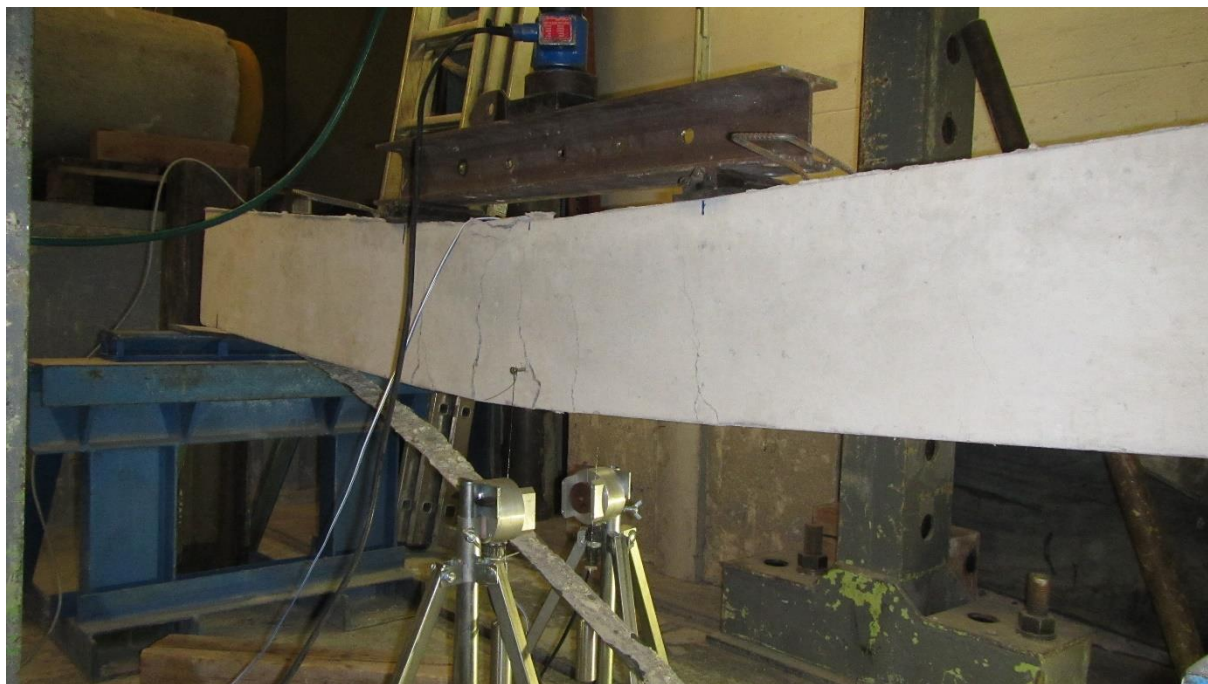
Obrázek P-37 Nalepená cfk lamela na zesíleném prvku před experimentem



Obrázek P-38 Trhliny v zesíleném prvku a jejich zakreslení



Obrázek P-39 Trhliny v porušeném zesíleném prvku a jejich zakreslení



Obrázek P-40 Porušený zesílený prvek s odtrženou cfk lamelou



Obrázek P-41 Porušený zesílený prvek - odtržená povrchová vrstva betonu



Obrázek P-42 Održžená cfk lamela



Obrázek P-43 Porušený beton v tlačené části s odporovým tenzometrem